المنظمة العربية للترجمة

Du droit à la philosophie

جويل دو روزناي

مغامرة الكائن الحيّ

ترجمة:

د. أحمد ذياب

علي مولا

الفهرسة أثناء النشر - إعداد دار الطليعة للطباعة والنشر
روزناي، جويل دو
مغامرة الكائن الحيّ / جويل دو روزناي؛
ترجمة أحمد ذياب؛ مراجعة محمد دبس.
٣١٢ ص. - (ثقافة علمية معاصرة).
ببليوغرافيا: ص ٢٨٥ - ٢٨٨.
يشتمل على فهرس عام.
ISBN 9953 - 410 - 54 - 2
١. أصل الحياة. ٢. الخلايا. ٣. علم الأحياء.
أ. ذياب، أحمد (مترجم)؛ ب. دبس، محمد (مُراجع)؛
ج. العنوان ؛ د. السلسلة.
576.83

«الآراء الواردة في هذا الكتاب لا تُعبِّر بالضرورة
عن اتجاهات تتبناها المنظمة العربية للترجمة»

Rosnay, *L'aventure du Vivant*
© 1988, Éd. du SEUIL, Paris
جميع الحقوق في الترجمة
العربية محفوظة لـ:

المنظمة العربية للترجمة

بناية شاتيلا وقهوجي، شارع ليون، ص. ب: ٥٩٩٦ - ١١٣
الحمراء - بيروت ٢٠٩٠ ١١٠٣ - لبنان
هاتف: ٧٥٣٠٣١ (٩٦١١)/ فاكس: ٧٥٣٠٣٢ (٩٦١١)
e-mail: info@aot. org. lb - http://www. aot. org. lb

«يصدر هذا الكتاب بدعم من وزارة الخارجية الفرنسية والسفارة الفرنسية في لبنان - قسم التعاون والعمل الثقافي - وذلك في إطار برنامج جورج شحادة للمساعدة على النشر».

«Cet ouvrage, publié dans le cadre du Programme d'Aide à la Publication Georges Shéhadé, bénéficie du soutien du Ministère des Affaires Etrangère, et du Service de Coopération et d'Action culturelle de l'Ambassade de France au Liban»

نشر وتوزيع: دار الطليعة للطباعة والنشر
بيروت - لبنان
ص.ب ١١١٨١٣
الرمز البريدي: ٩٠ ٧٢٠ ١١٠
تلفون: ٣١٤٦٥٩ / فاكس ٣٠٩٤٧٠ - ١ - ٩٦١

الطبعة الأولى: حزيران (يونيو) ٢٠٠٣

جويل دو روزناي

مغامرة الكائن الحيّ

ترجمة د. أحمد ذياب

مراجعة د. محمد دبس

المنظمة العربية للترجمة

المحتويات

تمهيد ٧
المقدمة ٩

القسم الأول: ما هي الحياة؟

١ ـ النظريات القديمة في أصل الحياة ١٣
تولّد عفوي للكائنات الحية ١٣
التطور: التاريخ العظيم للحياة ٢٠
٢ ـ عالم الجراثيم الغريب ٢٨
الأولانيّات: حيوانات أم نباتات؟ ٣١
البكتيريا: عبيد وحلفاء خفيّون ٣٥
الفيروسات: غزاة الخلايا ٣٨
خصائص الحياة ٤٥
٣ ـ كيف تعمل الخلية ٤٩
الحفظ الذاتي والشمس ٤٩
ـ الشمس المحفوظة ٥٥
ـ غلاية الخلايا ٦٣
التوالد الذاتي: أسرار حمض الديوكسي ريبونوكلييك (الدنا) ٦٩
ـ لبنات الخلايا ومخططاتها ٧٠
ـ افتح ايها الدنا! ٧٥
ـ الآليات الخلوية قيد العمل ٨٠

التنظيم الذاتي: ادارة الخلايا ٩١
- قواعد الحكم الخلوي ٩١
- شبكات الاتصال في الجزيئات ٩٦

القسم الثاني: من أين تأتي الحياة؟

١ ـ المقاربات الجديدة لأصل الحياة ١٠٣
أوپارين وتيلارد: الروّاد ١٠٣
في النجوم: لبنات الحياة ١٠٩
تخليق الحياة داخل المختبر ١١٨
٢ ـ نماذج أولية من الخلايا ١٣١
الأرض الأم ١٣٢
اسلافنا الجزيئات ١٣٤
- جزيئات كيميائية ١٣٤
- جزيئات لها ذاكرة ١٣٦
- جزيئات تتوالد ١٤٠
- جزيئات تقود الطاقة ١٤٢
- جزيئات تنعزل عن الماء ١٤٥
- بنى تنظّم ذاتياً ١٤٨
قطيرات غريبة ما قبل الحياة ١٥٢
من القطرات المجهرية الى أسلاف الخلايا ١٥٨
٣ ـ ظهور الكائنات الحيّة ١٦٤
إطلاق الوظائف الحيوية الكبرى ١٦٦
مصدر الرمز الجيني ١٧٢
اكتشاف سش ١٧٨
التخليق الضوئي والتنفّس: رأسمال الحياة ١٨٤
جذور التطور البيولوجي ١٩٢

القسم الثالث: إلى أين تمضي الحياة؟

١ ـ الثورة البيولوجية: آمال وتهديدات ٢٠١
فهم لغات الحياة ٢٠٢
المعركة ضد السرطان ٢٠٦
ـ على درب "الجينات السرطانية" ٢٠٨
ـ تحالف عالمي ٢١٣
٢ ـ أدوات الثورة البيولوجية ٢١٧
سحرة الجينات ٢١٧
الحلفاء غير المرئيين ٢٢٢
مهندسو اللامتناهي في الصغر ٢٢٨
الحاسوب والكائن الحيّ ٢٣٣
٣ ـ صناعة الكائن الحيّ ٢٣٧
ولادة الصناعة البيولوجية ٢٣٧
لا بطالة للميكروبات ٢٤٠
مستقبل الصناعة البيولوجية ٢٤٤
٤ ـ الانسان يهندس الانسان ٢٥١
الجراحة الجديدة للجينات ٢٥١
ولادات حسب الطلب ٢٥٤
جينات على الخريطة ٢٦٠
خلاصة ٢٦٥
الملاحق ٢٦٧
مراجع الكتاب ٢٨٥
ثبت المصطلحات ٢٨٩
فهرس عام ٣٠١

تمهيد

ولد هذا الكتاب مع الثورة البيولوجيّة. ظهرت أول صيغة له عام ١٩٦٥ بعنوان *Les origines de la vie* (أصل الحياة)، وذلك في زمن كان فيه أندريه لوف A. Lwoff وفرنسوا جاكوب F. Jacob وجاك مونو J. Monod قد نالوا جائزة نوبل على أعمال كانت لتترك أثرها في مستقبل البيولوجيا الجزيئية.

رغم ظهوره، منقّحاً، في عدد من الطبعات الجديدة، فقد كان هذا الكتاب يحتاج إلى إعادة صياغة تستوعب آخر التطوّرات التي حقّقها فهم أصل الحياة علاوة على اكتشافات الهندسة الجينية وازدهار التقانات البيولوجية والصناعات البيولوجية، وأيضاً تحدّيات "الهندسة" في مجال التوالد البشري.

إنه إذن كتاب جديد يستعيد المعلومات البيولوجية الأساسية ويقيم وزناً للاكتشافات الأكثر حداثة والزاخرة بمعاني تهمّ مستقبلنا.

تواصل وانقطاع، تقاليد وتصدّعات، تلك هي نوعية التأمل الذي تفرضه علينا البيولوجيا منذ بضع سنوات. وهذا الكتاب دليل أساسي في علوم الحياة، وكذلك شاهد على الفترة الرائعة التي نعيشها.

المقدمة

من منّا لا يهتمّ اليوم بالاكتشافات والتطوّرات البيولوجية؟ التلقيح في الأنبوب ونقل الأجنّة، والأدوية المبتكرة بفضل التقانات البيولوجية، وإحداث تغييرات في النباتات والحيوانات الأليفة، وإمكانية القضاء على المجاعة والأمراض المتوطنة الكبرى، والمعالجة المرتقبة للسرطان ونقص المناعة البشرية (السيدا أو الإيدز)، ومعالجة الجينات أو إجراء تغييرات في الدماغ، في كل ذلك تزرع البيولوجيا فينا الكثير من الوعود والآمال بقدر ما تزرعه من القلق والخوف على المستقبل الذي ينتظرنا.

منذ حوالى عشرين سنة ونحن نخضع لصدمة "الثورة البيولوجية". وقد توصّل عامة الناس والصناعيون والمسؤولون السياسيون إلى إدراك إسقاطات وتداعيات هذه الثورة في مختلف أوجه الحياة اليومية. وقليلة هي المسائل المهمّة في المجتمع التي لا تلجأ في يومنا هذا إلى المعطيات البيولوجية: التوالد البشري المراقب طبياً، وتأثير أساليب الحياة على نقص الضمان الاجتماعي، وسوء التغذية وتطوّر الدماغ، وحماية البيئة من التلوث الكيميائي أو الإشعاعي، ومكافحة المخدرات، ومكافحة التمييز العنصري، وتعليم الأطفال.

كيف يمكن لمثل هذه الثورة أن تؤثر فينا بشكل ملموس؟ كيف نفصل الوقائع عن الخيال العلمي؟ كيف نفهم الحياة في نهاية المطاف من أجل أن نحافظ عليها؟ المهمّة صعبة. فالحياة بمجملها تعصى

على التحليل. هل هذا يعني أنّ درسها لا يخضع للطريقة العلمية؟ بالتأكيد لا. فعلى ماذا يرتكز إذن هذا التطوّر المشهود للبيولوجيا؟ الحياة هي خاصية أنظمة شديدة التعقيد. ولكي نفهمها بشكل جيد، يجب توضيحها وتطويقها وتمثيلها حسب العديد من الأوجه التي تتكوّن منها عناصرها أو مبادئها الأساسيّة. نحن نواجه اليوم - من خلال هذا التعقيد ذاته - تحدّي الحياة: لذلك يجب علينا في الوقت نفسه أن نفهمها ونفكّر بشأنها، وأن نحسن على الأخص قيادتها من الآن فصاعداً. ولذلك، فإنّ دراسة أصل الحياة وآلياتها الأساسية وتغيّرات الكائنات الحيّة بواسطة الإنسان تمثّل أمراً في غاية الأهمّية.

وليس الهدف من هذا الكتاب سوى المساهمة في توضيح الطريق التي تؤدي إلى فهم أفضل للكائن الحيّ. وهي طريق مقسّمة إلى اتّجاهين متشابكين: اتّجاه فهم الإنسان للحياة، واتّجاه فعل الإنسان في الحياة. ولذلك فإنها تطرح ثلاثة أسئلة بسيطة: ما هي الحياة؟ ومن أين تأتي الحياة؟ وإلى أين تمضي الحياة؟

هذا الطريق يبدأ من أصل الحياة نفسها، من قلب الأشكال الرديمية للكائن الحيّ، ألا وهي الأسلاف البعيدة للخلايا.

القسم الأول

ما هي الحياة؟

ـ ١ ـ
النظريات القديمة في أصل الحياة

تولّد عفويّ للكائنات الحية؟

عندما نبحث عن تصوّر لكيفية ظهور الحياة على الأرض، غالباً ما نميل إلى تخيّل بداية فجائية أو عفوية أو ناتجة عن سبب طارئ أو خارق. هذه الفكرة الذاتية للتغيير المفاجئ ترسخّت بقوّة في تفكيرنا بحيث أنّه يصعب علينا كثيراً تصوّر احتمال آخر. كذلك، فإن بعضاً من معتقدات العصور القديمة أو القرون الوسطى لا زالت مستمرة إلى يومنا هذا. . .

وبنظر أجدادنا ليس هنالك من شك في ذلك: فأصل الحياة يوجد دوماً في الجماد. يكفي أن ننظر إلى الطبيعة بشيء من الاهتمام، حتى نشهد ولادة الدود من الوحل، والذباب من اللحوم المتعفّنة، والفئران من النفايات أو الخرق البالية. فأينما نجد مواد عضويّة في حالة تفكّك أو مواد معدنية موضوعة في ظروف معيّنة، يمكننا أن نشهد التكوّن العفويّ للكائنات الحيّة.

يزخر التاريخ بهذا النوع من الكتابات، كما أنّ المخطوطات الأولى التي وردتنا من الصين أو بابل أو الهند أو مصر تُظهر مدى اعتقادنا الحاسم في عملية التولّد العفويّ.

في نظر أرسطو (٣٨٤ ـ٣٢٢ ق.م.)، تتحدّر الحيوانات عامة من كائنات عضوية متماثلة، ولكن يمكنها أيضاً أن تولد من المادّة

الجامدة. وقد وُصفت في العديد من المؤلفات حالات من التولّد العفوي للذباب أو البعوض أو القراد انطلاقاً من وحل الآبار أو روث الحيوانات، أو تولّد الاربيان والثعابين البحرية (الأنقليس) والرخويّات والأسماك من الطمي الراكد أو الطحالب المفكّكة، أو تولّد الفئران من التربة الرطبة، وحتّى تولّد حيوانات عليا كانت تظهر في الأصل في شكل "ديدان".

إلى أية نظرية يمكن أن ينتمي هذا النوع من الظواهر؟ فبحسب أرسطو يوجد لكل شيء "مبدأ سلبيّ" وهو المادّة أو الهيولى و"مبدأ فعّال" وهو **الصورة** أو **الشكل**. وجميع المخلوقات تنتج عن التقاء هذين المبدأين كلّما كانت الظروف ملائمة. فالمبدأ الفعّال "يُعلم" المادّة ويعطيها شكلها. وعلى سبيل المثال فإن بيضة السمكة الملقّحة تحتوي على "مبدأ فعّال" ـ ليس مادة، ولكنّه "قدرة" على تنظيم المادّة من بيضة إلى سمكة.

لم يتم الخوض في تعاليم أرسطو، التي وصلتنا على مرّ العصور بواسطة سلسلة طويلة من المفكّرين، إلاّ مع بداية القرن السابع عشر.

خلال الفترة الطويلة من الغشاوة العلميّة المتمثلة بالقرون الوسطى، كان أعظم المفكرين يعتقدون بنظرية التولّد العفوي. وكان كلّ واحد منهم يضيف إليها ما يراه مناسبا من التفاصيل. ولكن في الفترة التي كان العلم والفلسفة فيها تحت المراقبة وحتى الرقابة المباشرة من قِبل رجال الدين، كان من الخطر معارضة تعاليم مفكّرين من منزلة أرسطو والقديس أغسطينوس وتوما الاكويني.

وكان لا بد من انتظار النصف الثاني من القرن السادس عشر، وخاصّة القرن السابع عشر، لكي يؤدي تطبيق الفكر النقدي والطريقة التجريبيّة على رصد الأحداث الطبيعية إلى نهضة العلوم التي سميّت بالعلوم الصحيحة.

في تلك الفترة، تمكّن كوبرنيك وخصوصاً غاليليو (المتوفى سنة

١٦٤٢) من تقويض نظريّة مركزيّة الأرض القديمة، الموروثة عن اليونانيين. وبما أنهما كانا يعتقدان بدوران الأرض عوضاً عن "السماء"، فقد جعل كلّ منهما الفكر الإنساني يسلّم بالوجود المقلق لفضاء غير محدود.

ومع ذلك، وعلى الرغم من هذا الانقلاب في مفاهيم علم نشأة الكون، الذي نبّه إلى اللامتناهي في الكبر، وربما في نفس الوقت إلى اللامتناهي في الصغر، بدت علوم الحياة وكأنها باقية في المرحلة التي كانت عليها منذ مئات السنين. فواصل علماء وفلاسفة مشاهير، أمثال وليام هارفي الشهير ببحوثه حول دوران الدم، ورينيه ديكارت وإسحاق نيوتن قبول نظرية التولّد العفوي بدون تحفّظ كبير.

أما جان باتيست فان هلمونت Jean-Baptiste Van Helmont الطبيب الشهير في بروكسل(١٥٧٧ ـ ١٦٤٤) ومؤلّف الأعمال التي اعتبرت مرجعاً في فيزيولوجيا النبات، فقد ذهب إلى درجة تقديم وصفة لتوليد الفئران خلال ٢١ يوماً بواسطة بعض بذور القمح وقميص متسخ موضوعة في صندوق، بحيث يلعب العَرَق الموجود في القميص دور "المبدأ الحيوي".

مرحلة تلو أخرى، بدأ بناء نظرية التولّد العفوي يتصدّع. وأوّل اهتزاز جدي في هذه النظرية كان مصدره إيطاليا، وقد هيّأ الساحة لجدال متّقد دام أكثر من قرنين من الزمن.

لم يكن الطبيب وعالم البيولوجيا الفلورنسي فرنسيسكو ريدي Francisco Redi (١٦٢٦ ـ ١٦٩٨) مقتنعاً بالنظرية الرسمية. بل كان يؤمن بأن "الأرض، بعد أن تسببت في البداية بظهور الحيوانات والنباتات، حسب مشيئة الخالق سبحانه وتعالى، لم تشهد بعد ذلك أيّة ولادة لأيّ نوع من النبات أو الحيوان. وبنظره أن الحياة لا تأتي إلاّ من حياة وُجدت من قبل. ولذلك فإن "الدّيدان" التي نراها "تتولّد" من المواد المتعفنة هي في الحقيقة نتيجة لعملية "تلقيح" (توالد جنسي) معينة. فالأجسام المتحللة تشكّل أعشاشاً لبعض

الحيوانات التي تضع فيها بيوضها وغذاء "للديدان" التي تنمو فيها. ولدعم فرضيته، قرّر ريدي سنة ١٦٦٨ اختبارها عن طريق التجربة. فوضع في قوارير بعض المواد العضويّة المتحلّلة. وغطّى القارورة الأولى بستر شفّاف وترك الثانية مكشوفة. واستنتج ريدي أن سُرف الذباب asticots يتطور بسرعة في القارورة الثانية. بالمقابل، بقيت قطعة اللحم الموضوعة في القارورة الأولى خالية من اليرقات. ويمكننا أن نستنتج أنّ الذباب وضع بيضه فوق الستر الشفاف.

وهكذا فقد تمكّن من إثبات أن الاعتقاد بتولّد عفويّ لسُرَف الذباب في المواد المتحللة ينشأ عن خطأ في الملاحظة. ومع ذلك فقد تواصلت الأفكار المتوارثة، وكانت في بعض الأحيان قوية لدرجة أنه ظل يُعتقد، بطريقة روتينية، بإمكانية وجود بعض أنواع التولّد العفوي.

ومع تقدّم الملاحظة والتجربة أصبح بديهيّاً أكثر فأكثر، حتى بالنسبة إلى المؤيدين الأكثر تشدّداً للتولّد العفوي، أنّ هذه الظاهرة قد لا تصلح إلاّ للحيوانات الصغيرة جدّاً. فالضفادع أو الفئران أو الثعابين تركت المجال للكائنات الأصغر التي يمكن رؤيتها بالعين المجرّدة: الحشرات والدويدات والبراغيث... ومع ذلك، فقد أثبتت تجارب ريدي، حتّى في هذه الحالة، أنّ التولّد العفوي للأجسام المعقّدة جدّاً أمر مستحيل. هكذا بدأ التشكيك في صلاحية النظرية الكلاسيكية. ولكنّ هذا الشكّ لم يدم طويلاً.

بواسطة مجهر بدائيّ صنعه بنفسه، استطاع أحد معاصري ريدي، الهولندي الأصل أنطوان فان لووينهوك Antoine Van Leeuwenhoek (١٦٣٢ ـ ١٧٢٣) أن يكتشف ويصف عالماً غير متوقّع، ألا وهو عالم الحياة اللاّمرئيّة.

هذا العالِم النشيط، والمراقب البارع الذي لا يكلّ، والرجل المميز، وصف بكل روعة العديد من الأحياء المجهرية المعروفة اليوم (الخمائر، البكتيريا، النقاعيّات)، وعرض اكتشافاته على الجمعية

الملكية بلندن في سلسلة من البحوث المشهورة. ومنذ ذلك الحين، وبالاستعانة بذلك المجهر المدهش، أصبح بإمكان أي واحد منا أن يكشف أحياء مجهريّة وفيرة وذلك حيثما توجد مواد في حالة تعفّن أو في حالة تفكّك.

ومع ذلك، لم يرد أحد الاعتراف بأنّ أحياءً مجهرية بالغة الصغر، وبسيطة وكثيرة بهذا القدر يمكن أن تولد بالتوالد الجنسي. لا، إنها البداهة بحد ذاتها: فهي تتكون بتولّد عفويّ انطلاقاً من حساء غذائي أو أيّ سائل آخر يمكن أن تظهر من خلاله.

أمّا لووينهوك فلم يكن هو الآخر مقتنعاً. وبالنسبة له، فإن "بذور" هذه الجراثيم تأتي من الهواء المُحيط. وقد قام أحد طلاّبه، واسمه جوبلوت Joblot، بتجربة مقنعة جدّاً: فقد بيّن أن ماء التبن بعد غليه ثم تعريضه للهواء سرعان ما يمتلئ بالأحياء المجهرية، مع أن نفس السائل، إذا تمّت تغطيته بغشاء رقيق، يبقى معقّماً لفترةٍ طويلة. لكن للأسف، فكما هو الشأن بالنسبة إلى ريدي لم يكن الرأي العام مستعداً لقبول هذه التجارب. وبالتالي فقد تناساها الناس.

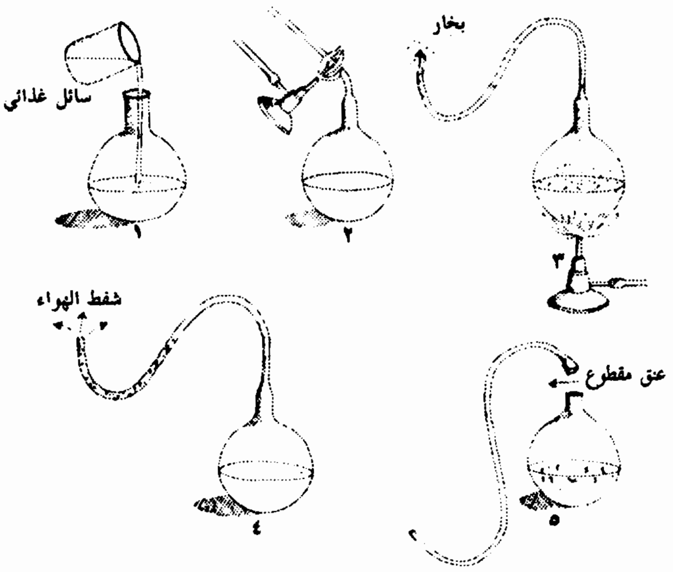
في نهاية القرن الثامن عشر، نشب خلاف حادّ بين اثنين من الرهبان من أنصار الطبيعة: الأسكتلندي جون نيدهام John Needham والإيطالي لازارو سپالنّزاني Lazzaro Spallanzani. الأوّل وهو صديق بوفون Buffon يريد أن يثبت بواسطة مجموعة من التجارب - مطابقة لتجارب جوبلوت - إمكانية حدوث التولّد العفويّ. ورغم كلّ "الاحتياطات الممكنة" (تسخين السوائل لمدّة طويلة، قوارير محكمة الإغلاق) كان يظهر في كلّ تجربة عدد لا يُحصى من الأحياء المجهرية. يعترض سپالنّزاني على أن نيدهام لم يسخّن القوارير بما فيه الكفاية لتعقيمها. في المقابل، يجيب نيدهام أنّ سپالنزاني يحطّم "المبدأ الحيوي" ويغيّر "خصائص الهواء" بطريقة تعسّفية. فيسترجع سپالنزاني أهداف نيدهام نقطة نقطة في سلسلة جديدة من التجارب

الناجحة... بيد أنّه لم يتمكّن من تغيير الرأي.

وكان لا بد من براهين پاستور بعد مائة سنة لوضع حدّ نهائي لهذا الاعتراض: حدّ نهائي بإمكانه تمزيق الغشاوة التي تحجب المشاكل الحقيقية التي يطرحها أصل الحياة، وقد كلف ذلك أزمة قيست نتائجها فيما بعد.

في سنة ١٨٥٩، نشر العالم الفرنسي فيليكس پوشيه Phelix Pouchet مُؤلفا ضخما من سبعمائة صفحة يتضمّن الأفكار الأكثر تقدّماً حول نظرية التولّد العفوي. وقد أضاف أيضاً إسناداً لأطروحته كمّية لا بأس بها من نتائج تجربته جاءت كلها ملائمة للنظرية التي يدافع عنها كمؤيّد جسور ومتصل. يُظهر عمل پوشيه إلى أيّ مدى يمكننا أن نصدق أو نتوصل إلى "إثبات" ما "نريد" تصديقه! في تلك الفترة، قرّرت أكاديمية العلوم بباريس منح جائزة لمن ينجح في حسم هذه المسألة المزعجة بصورة نهائية.

في سنة ١٨٦٢، أثبت لويس پاستور بطريقة لا تقبل الدحض وبواسطة تجارب اشتهرت فيما بعد أن الجراثيم لا تعجّ في الهواء والغبار الذي نتنفّسه فحسب بل أيضاً فوق أيدينا أو فوق الأواني التي تستعمل في التجارب. فجميع "حالات التولّد العفوي" تنتج في الحقيقة عن تلوّث مرق الاستنبات بجراثيم آتية من الخارج. سيكون من الصعب وصف التجارب بدقّة والنتائج التي أحرزها پاستور. فيما يلي نشرح، بواسطة بعض الرسوم، إحدى هذه التجارب الدقيقة: يسكب سائل غذائيّ (ماء خميرة البيرة، عصير الشمندر) في بالون طويل العنق (١). يُسحب عنق البالون بواسطة التسخين ليتحوّل إلى أنبوب دقيق ملتو (عنق البجعة) (٢). يسخّن السائل إلى درجة الغليان: هذه العملية تقتل جميع الأحياء المجهرية الموجودة (٣). يبقى الغبار الذي يحتوي على الميكروبات محجوزاً بقطرات الماء في نهاية الأنبوب. يبقى البالون معقّماً لأمد طويل جداً (٤). وإذا قطعنا عنق البالون تغزو الجراثيم المرق الغذائي بسرعة (٥).



تجربة باستور

تثبت الملاحظة أن الجراثيم هي، رغم صغر حجمها، أحياء شديدة التعقيد. كذلك، فإن الاعتقاد، بحسب باستور، بإمكانية التشكّل العفوي للجراثيم أمر يستحيل تصديقه بمثل ما يستحيل تصديق الظهور المفاجئ للذباب من المواد المتحللة في زمن ريدي! يبدو أنّ باستور أثبت نهائياً أن الحياة لا يمكن أن تظهر إلاّ من حياة سبق وجودها. منذ ذلك الحين، أصبح الجواب عن السؤال "كيف بدأت الحياة؟" غير ممكن. وبالفعل فقد كانت الإجابتان المقدّمتان حتى الآن:

١ ـ الحياة وجدت بطريقة فوق طبيعية؛

٢ ـ تولد الحياة دائماً من كائن غير حيّ بواسطة التولّد العفويّ.

الإجابة الأولى لا يمكن أن تقنع عالماً متطلّباً. أمّا الإجابة الثانية فمن البديهيّ أن تنتج عن أخطاء كبيرة في الملاحظة. يجب إذن أن نكفّ

عن طرح السؤال. وقد ذهب بعض العلماء إلى حدّ التصريح بأنّ دراسة هذه المسألة لم تكن سوى مضيعة للوقت وأنّ البحث عن حلول لها لا يمثّل أيّة أهمية علمية مباشرة.

يبدو أنّ الأغلبية الساحقة لمؤيّدي هذه المناقشات - مهما كانت انتماءاتهم - قد مزجت ما بين مفهومي **العفوية والفجائية**. إذ إنه لم يخطر ببال أيّ كان أن الحياة ظهرت تدريجياً وبشكل تطوري. كما أنّه قد غاب فعلاً عن العلماء في تلك الفترة بُعد هامّ للطبيعة: ألا وهو **الزمن**.

شكل اكتشاف الزمن بالنسبة إلى العقول حدثاً مربكاً جداً بمثل ما كان اكتشاف الفضاء - من اللامتناهي في الكبر إلى اللامتناهي في الصغر. وليس هنا اكتشاف الزمن الذي "يمرّ" أي الزمن الذي استأنسه الإنسان وعرف كيف يقيسه منذ عهد بعيد، ولكن الوقت الذي "يضيف"، أي الوقت التاريخي. فمع هذا الوقت يضيء ماضي الإنسان والماضي العظيم للحياة بحد ذاتها.

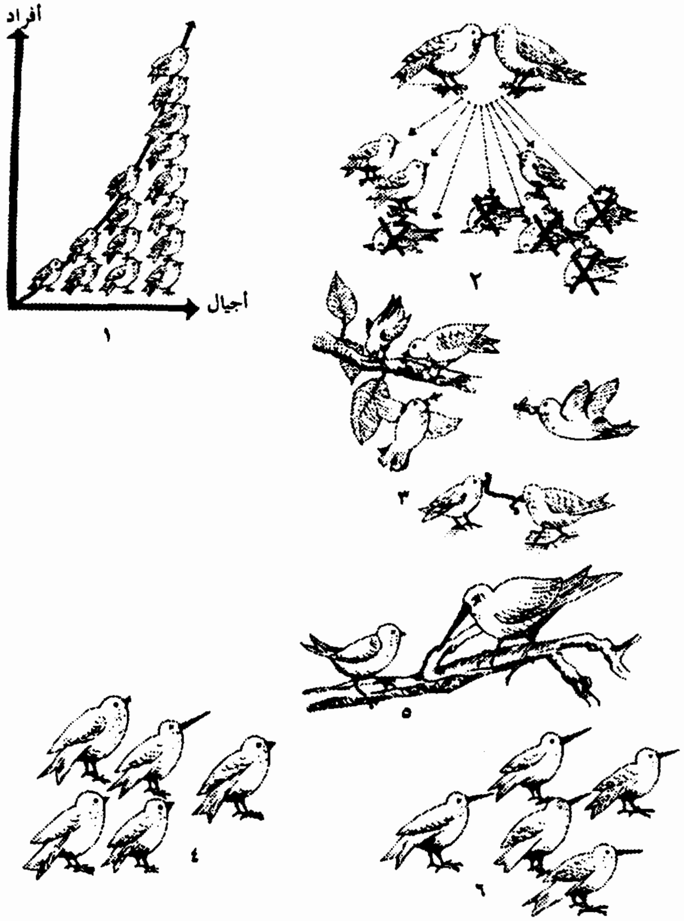
التطوّر : التاريخ العظيم للحياة

شهدت سنة ١٨٥٩ نشر كتاب پوشيه Pouchet في تأييد نظرية التولّد العفوي. وكانت كذلك سنة إصدار الكتاب الذي يُفترض به التأثير بطريقة حاسمة في الفكر العلمي والفلسفي: **أصل الأنواع** لتشارلز داروين.

حسب داروين ونظريته، فإنّ الأشكال الحيّة التي يمكن أن نرصدها في الطبيعة لم تظهر بشكل عفوي. فهي تتحدّر من بعضها البعض مع **تغيّرات لا تظهر إلاّ بمرور فترات زمنية مديدة**.

عندما تأمّل داروين الكائنات التي كانت تعيش في عصره ودوّن الاختلافات الطفيفة التي تظهر بينها، تفطّن إلى العديد من التغيّرات التي تطرأ داخل النوع نفسه. من ناحية أخرى، تختلف الحيوانات والنباتات الموجودة الآن عن تلك التي عاشت منذ ملايين السنين.

فالأحافير المدفونة، تلك البقايا المعدنية للحيوانات أو النباتات التي عاشت في عصور بعيدة جدّاً.... ما هي إلا دليل قاطع على هذا التغيير. ونتيجة لذلك ـ وخلافا لاعتقاد متّفق عليه عموماً ـ، **فإنّ الكائنات ليست مستقرّة ولكنها تتغيّر على مرّ مراحل طويلة.**



يمكن توضيح نظرية داروين بواسطة سلسلة من الرسوم (انظر الشكل السابق). وأهم المفاهيم الأساسية لهذه النظرية هي: التكاثر، والصراع من أجل الحياة، والتغيّرات (نسمّيها اليوم الطفور *mutation*)، **والانتقاء الطبيعي**.

يزداد عدد أفراد النوع الواحد بحسب متوالية هندسيّة (١). ومع ذلك ففي كل جيل يبقى عدد الأفراد في النوع الواحد ثابتاً (٢). إذن يوجد صراع من أجل الغذاء والحياة (٣).

تحدث بعض التغيّرات (الطفرات) لدى الأفراد من النوع نفسه (٤). وقد تكون هذه التغيّرات ملائمة وتساعد الفرد على البقاء (٥). كما تنتقل هذه التغيّرات من جيل لآخر. والمعروف أن نوع الطيور ذات المنقار الطويل، والمميّز عن غيره، قد تمكّن من البقاء بواسطة الانتقاء الطبيعي (٦)(*).

بما أنّ الكائنات تتحدر هكذا الواحدة من الأخرى متغيّرة بالتنوّع والانتقاء الطبيعي، فإن أشكالها الأكثر بساطة ستبدو إذن أنها الأكثر قدماً. وهنا يظهر فجأة بُعد غير متوقّع: **عمق الماضي**. وهذا المعطى الهام سيسلّط الضوء الجديد على المسألة القديمة المتعلقة بأصل الحياة. وتتيح لنا المقارنة التالية أن نفهم جيداً معنى هذا "البعد الرابع" الذي يمثّل مدّة التطوّر: فبواسطة بعد واحد يمكن أن نحدّد خطّاً، وبواسطة بعدين يمكن أن نمثّل سطحاً (من غير سماكة)، وبثلاثة أبعاد يمكن أن نحدّد حجماً.

بدون إدراك الزمن الذي يعطي شكله وعمقه وتواصله مع الأشياء، كان يمكن أن يُشَبَّه أجدادنا بكائنات "مسطحة" ثنائية البعد. فالأشكال الحيّة التي كانوا يرونها حولهم ليس لها ماض ولا تاريخ. وهذه الأشكال، بنظرهم، كانت تظهر فجأة وتلقائياً في زمن حاضر أبدي لا يقوم إلا بتكرار نفسه. وندرك في هذه الحالة أنّ معرفة

(*) نتفق على أن هذاه الطيور تتغذى عموماً على الديدان الصغيرة التي تحصل عليها من ثقوب الخشب.

واكتشاف الأشكال الجديدة لا يمكنها إلاّ أن تنتشر في الفضاء، أي في البُعد. وهذا ما حصل فعلاً. فباكتشاف المتناهي الصغر والميكروبات، ينتشر المخطّط. لكنّنا لا نفهم دائماً العلاقة الخفيّة التي توجد بين الأنواع. وكنا نعرف كيف نرتّب ونصنّف وننظّم أشكالاً ثابتة وغير متحرّكة ولكن يبقى أصلها غامضاً. وعلى العكس من ذلك، فما أن صار بالإمكان إدراك "الشكل" الذي أتت به النظرية الداروينية في التطوّر حتى توقّفت الأشكال الحيّة عن الترتّب في الفضاء داخل أقواس واصطفّت - من الأبسط إلى الأكثر تعقيداً - في نظام زمنيّ بحسب ظهورها بحيث أخذت الأقواس شكل **شجرة النسب**.

بعد ذلك وبعد داروين بمدّة طويلة، وبمساعدة دراسة الأحافير (علم الأحافير أو الباليونتولوجيا) والدراسة المقارنة لأجنّة العديد من الأنواع (علم الأجنّة)، أصبح من الممكن أن نعيد بدقة رسم **شجرة نسب الأنواع**. فيما يلي (ص ٢٥) شكل مبسّط لها سيساعدنا في بقية هذا الكتاب.

مثلما جعل الإنسان "التاريخ" يبتدئ مع "خلق" الإنسان، حدد داروين بداية التطوّر بأصل الحياة. وبما أن منطق مبدأ التطوّر نفسه يفرض علينا الرجوع في الزمن إلى أشكال الحياة الأكثر بساطة والمشابهة للأحياء المجهرية المكتشفة في القرن السابع عشر، فإننا سنصل حتماً إلى "أوّل خليّة حية"، تماماً مثلما سبق أن وصلنا إلى "الإنسان الأول" عند رجوعنا في التاريخ إلى الوراء.

إن الوجود المفاجئ لهذه الحياة المجهريّة، ليس في شكل جيل متواصل ولكن دفعة واحدة في فترة من الماضي، أفسح المجال لنشوء فرضيّات جديدة. هذه الفرضيّات وإن كان العديد من العلماء متفقين بشأنها في الوقت الحاضر، فإنّها تسجّل سوء توافق في البعد الجديد للزمن وطبيعته العميقة.

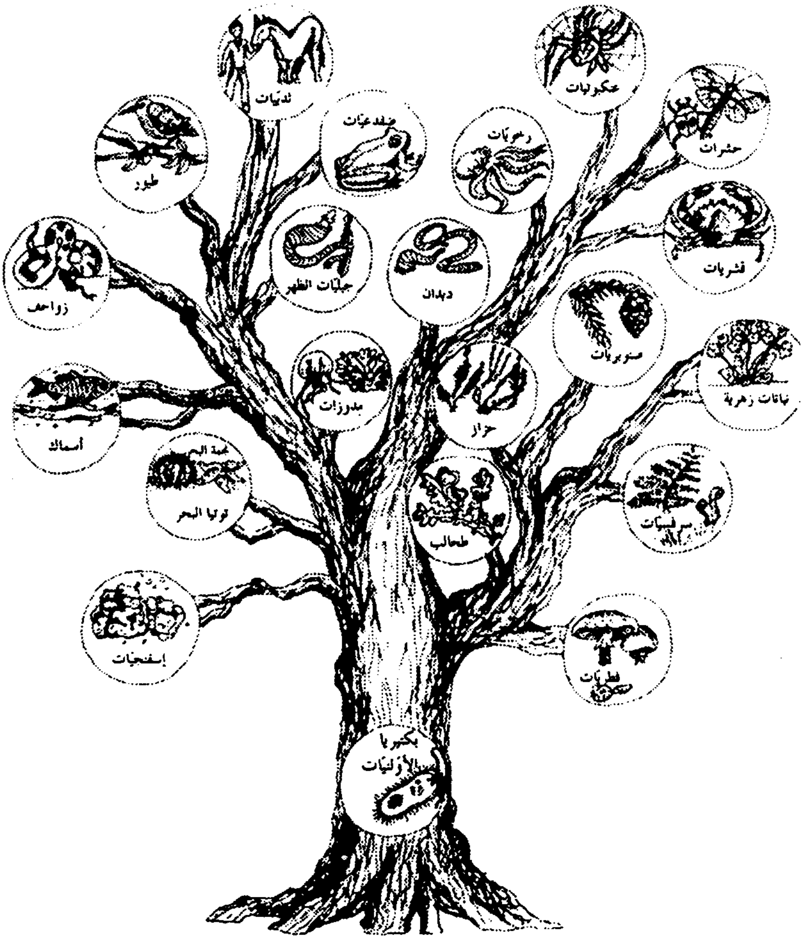
في نظر البعض، كان تفسير أصل الحياة بسيط جداً: جراثيم

حُملت بواسطة أحجار نيزكيّة أو بواسطة غبار كونيّ انتشرت في الأرض خلال ماضيها السحيق. هذه الجراثيم ولّدت بعد ذلك، بواسطة التطوّر، جميع اشكال الحياة الموجودة فوق كوكبنا.

لكن هذه النظرية، التي أطلق عليها اسم "التَّبَزُّرُ" الشامل *panspermie* اصطدمت باعتراضات جدّية. فالأحياء المجهريّة المنساقة في الفضاء فوق غبار يحركه ضغط الإشعاعات، كانت، بناء لاقتراح الكيميائي السويدي سڤانت أرينيوس Svante Arrhenius سنة ١٩٠٨، تتعرّض خلال رحلتها الطويلة لظروف قاسية جداً، والاحتمال ضئيل جداً في أن تكون هذه الجراثيم قد نجحت في البقاء - حتى في شكل أبواغ مقاومة - رغم خطر الأشعة فوق البنفسجية والأشعّة الكونية ودرجات الحرارة القصوى.

منذ عهد قريب، وبالتحديد سنة ١٩٧٧، اقترح كلّ من عالم الفلك البريطاني فريد هويل Fred Hoyle ون. س. ڤيكرامازينغي N.C. Wickramasinghe أنّ لبِنات الحياة تتكوّن باستمرار في الكون وأن المذنّبات يمكنها أن تكون عبارة عن "مبعوثين" يجلبون إلى الأرض بذور الحياة ولكن في شكل فيروسات أو بكتيريا. هذه الفرضية أعيد طرحها سنة ١٩٨٢ على يد البريطاني الحائز على جائزة نوبل، ف. هـ. س. كريك F.H.C. Crick الذي أضاف إلى مفهوم التَّبزُّر الشامل التلقيح "الإرادي" **للأرض** بذكاء مصدره الفضاء الخارجي! ولا حاجة بنا أن نوضح أن هذه النظريات لازالت تلقى معارضة قوية في أوساط أهل العلم.

حتى يومنا هذا، بقيت هذه الأسئلة موضوع جدال. فقد مكّن العديد من التحاليل الدقيقة جداً من إثبات وجود مواد عضويّة في بعض عيّنات الأحجار النيزكيّة. ومثلما يصعب علينا تجنّب العداوي البكتيرية من أصل أرضي، فإننا نعجز إلى الآن عن تحديد أصل هذه المركّبات العضوية بشكل دقيق. لكن المعلومات التي حصلنا عليها من الأحجار النيزكيّة ثمينة جدّاً. فضلاً عن ذلك، تدل القياسات



شجرة تطور الأنواع

المأخوذة سنة ١٩٨٦ بواسطة المسابير الفضائية على مذنّب "هالي" على أنّ نواة هذا الأخير تحتوي على جزيئات عضوية أكثر تعقيداً ممّا يمكن تصوّره.

أما بالنسبة إلى غالبية العلماء الذين تبدو لهم فرضيّة التّبزّر الشامل حلاً مساعدا في بحثهم عن المسألة الحقيقية لأصل الحياة،

فلا يبقى لهم من تفسير إلا "الخلق بالصدفة".

لا يزال هذا المفهوم منتشراً بقوّة. وبحسبه، يمكن أن يكون الظهور المفاجئ، في فترة قديمة جدّاً من تاريخ الأرض، لكائنات بسيطة جدّاً (مشابهة للفيروسات) ناجم عن اتحاد كيميائي غير مقصود، سببه الالتقاء العفوي لبعض المواد الموجودة بنسب معينة. ولكي يحصل مثل هذا الحدث البعيد الاحتمال، ولو لمرّة واحدة، يكفي أن نتخيّل وجود مدة طويلة بما فيه الكفاية لكي «يحظى بالصدفة». وكما يقول ج. ڤالد G. Wald: «... بمرور الوقت، يصبح المستحيل ممكناً، والممكن محتملاً، والمحتمل تصوّراً أكيداً». آنذاك، تتطوّر "الجينات العارية" عند تكوينها ويولد منها كلّ عالم الأحياء انطلاقاً من عمليات الطفور والانتقاء الطبيعي.

مثل هذا التلاقي للأحداث، الذي يجلب إلى مسافة معقولة المركّبات الكيميائية اللازمة والمواد المزوّدة بالطاقة والحفّازات الضروريّة ...، يمثّل صدفة "إعجازيّة" بحيث لا يكون مدهشاً، حسب مؤيّدي هذه الفرضيّة، عدم تجدّد "هذه المعجزة" منذ ذلك الحين. ولهذا السبب يكون للحياة أصل واحد.

بذلك، نعثر، وفقاً "للخلق بالصدفة"، على المفهوم الذاتي القديم: الفجائية في ظهور الحياة.

رغم ذلك، حقّق العلم تقدّماً سريعاً خلال هذه السنوات الأخيرة. كذلك، مكّنت البيوكيمياء والبيولوجيا الجزيئية والسّيبَرنِيّات (علم عمليات التواصل والتحكّم في الحيوانات والآلات) من تكوين فكرة أكثر دقّة حول ظاهرة "الحياة". فهل من الممكن أن نقيم حدوداً بين الجماد والكائن الحيّ؟

قديماً، اكتشف علماء التشريح والفيزيولوجيا بذهول التنظيم الخارق لمكوّنات الحياة: الأعضاء، والأنسجة، والأوعية، والشعيرات، والأعصاب، والعضلات، والعظام. أمّا اليوم، فيجد علماء البيولوجيا الجزيئيّة والخلويّة أنفسهم في حالة مشابهة، لكن

هذه المرّة على مقياس جزء من الألف من الملّيمتر: لقد اكتشفوا، في قلب الخليّة نفسها، وبفضل المجهر الإلكتروني وتقنيات التوسيم marquage، تنوّعَ وتشعّب الأعضاء الجزيئية التي "تسيّر" الخلايا الحية.

لقد سبق أن دفع لويس پاستور بحدود الكائن الحيّ موضّحاً الدّور المهيمن للجراثيم التي لا تُرى بالعين المجرّدة بالرغم من أنّها تكون تارة مسؤولة عن أسوأ الأمراض وطوراً تكون حليفة الإنسان في صنعه للأغذية والمشروبات. فبتعليمه لنا كيف نحمي أنفسنا من الجراثيم الخطرة، صار پاستور رائد الطبّ الحديث. لكنّه بإيضاحه لنا كيفية ترويض حلفائنا غير المرئيين، أصبح أيضاً رائد الصناعة البيولوجيّة. بعد قرابة قرن، قام كلّ من جاك مونو وعلماء البيولوجيا الجزيئية بتوسيع حدود البيولوجيا، وهذه المرّة باتّجاه الجزيئات التي يدرسها الكيميائيون والفيزيائيون على السواء. بعدئذ، أقاموا جسراً بين عالم الأحياء المجهرية وعالم الجزيئات. ولأول مرة، صار ممكناً آنذاك فهم وترجمة الآليات الأساسية للحياة بلغة المعارف والتفاعلات الحاصلة على مستوى الجزيئات. منذ ذلك الحين أصبحت ساحة معركة الثورة البيولوجية تتحول إلى قلب الخليّة سواء كانت بكتيرية أو حيوانية أو نباتية، وهو عالم رائع مسكون بالرسائل المرموزة وأجهزة الاستقبال وشبكات الاتّصال وخزن المعلومات، أو بالآلات المجهرية الجزيئيّة والاوتوماتية.

لنذهب إذن في رحلة إلى وسط الحياة ضمن عالم الفيروسات والجراثيم والخلايا.

- ٢ -

عالم الجراثيم الغريب

عندما ننظر إلى شجرة نسب الأنواع الحيّة، نلحظ أنّ أنواع الكائنات الحيوانيّة والنباتيّة في الوقت الحاضر تنشأ عن التنظيم والتشعّب التدريجي للكائنات الحيّة البسيطة جدّاً، كونها الكائنات الوحيدة التي سكنت **الأرض** منذ مليارات السنين، ولا يزال المتحدّرون منها يقيمون بيننا. إنّها هذه الكائنات المجهرية الشديدة التكاثر التي تظهر في مرق مستنبتات جوبلوت Joblot ونيدهام Needham وباستور Pasteur. فكيف تتكوّن؟ وكيف تعيش؟

إن هذا العالم الغريب الذي تغرس فيه شجرة الحياة جذورها، ويقع على تخوم العالم الحيواني والنباتي والجزيئي هو عالم **الأوّلانيّات** *protistes*، **والبكتيريا والفيروسات**. وهو يفلت من جميع طاقات استيعابنا. ولذلك يصعب علينا أن نتصور الأطوال التي هي دون الملّيمتر ما لم نتزود من الآن بأداة "غوص" تمكننا من سبر كل ما هو متناه في الصغر: أي مقياس للاستدلال.

يسمح المجهر البصري، الذي يكبّر الأشياء ألف مرة، بمشاهدة الأجسام التي تكون بحدود الميكرون(*). أما المجهر الإلكتروني، الذي يكبّر الأشياء حوالى ٥٠٠٠٠ مرّة، فيسمح بمشاهدة أجسام تتراوح أحجامها بين ١٠ و١٠٠ نانومتر(**). كما أن المجهر فائق

(*) الميكرون = جزء من ألف من المليمتر.

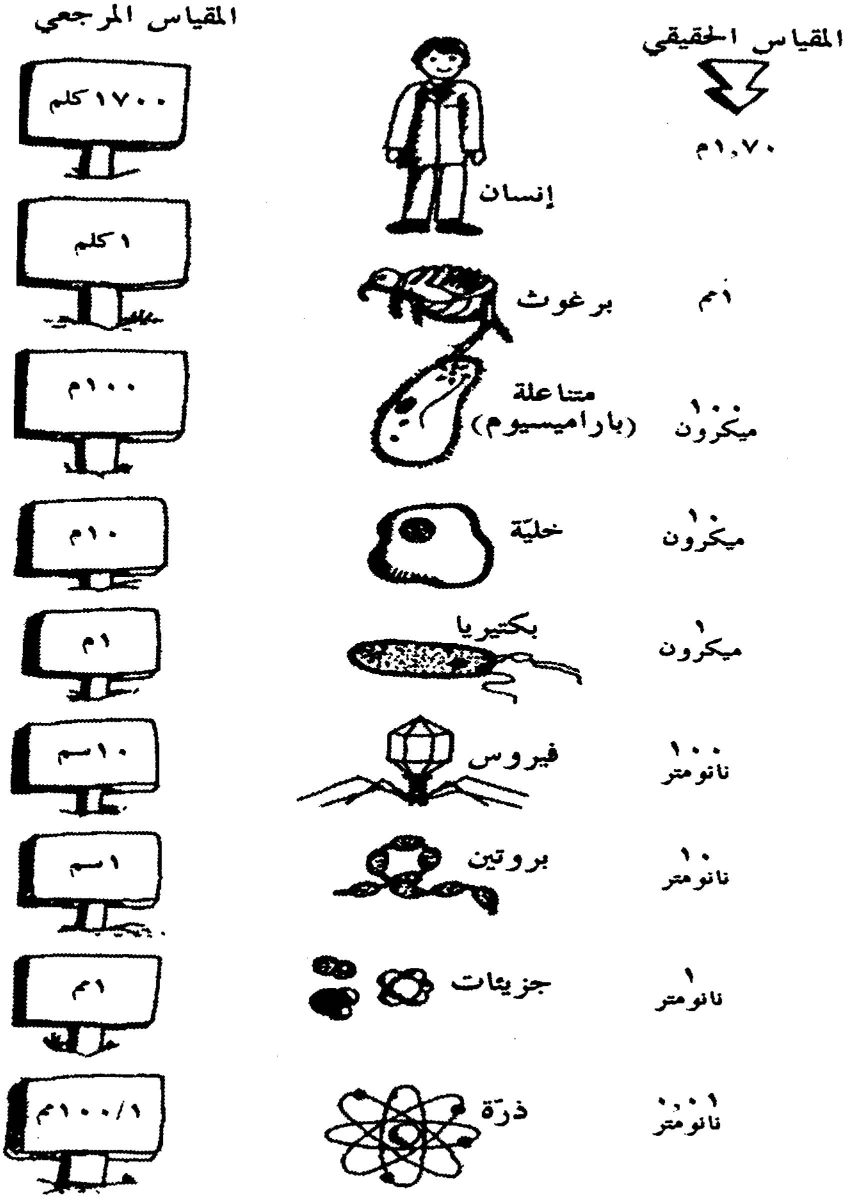
(**) النانومتر= جزء من مليون من المليمتر.

القدرة يعطينا تكبيراً بحدود المليون. وبفضل هذا الجهاز، يصبح الجزيء بحجم المليمتر ويصبح البرغوث (مليمتر واحد) بحجم ساحة الكونكورد الباريسية، فيما يصبح الشخص الذي يبلغ طوله متراً وسبعين سنتيمتراً بحجم ١٧٠٠ كلم!

وهناك مقياس هامّ آخر يتمثل بدرجة التعقيد complexité. ويمكننا قياسه بعدد "الأحرف" الموجودة في الخرائط الكيميائية الوراثية التي تسمح للفيروس أو البكتيريا أو الخليّة البشريّة بالتوالد. تشتمل خريطة الفيروس (مثل خريطة الالتهاب الكبدي البائي) على ٣١٨٢ "حرفاً" من الرمز الجيني، أي ما يعادل صفحة من ٣٠٠٠ حرف (بمعدل ٦٠ حرفاً في السطر و٥٠ سطراً في الصفحة). وتحتوي خريطة البكتيريا على ٣ ملايين حرف، أي ما يعادل ١٠٠٠ صفحة بمعدل ٣٠٠٠ حرف في الصفحة الواحدة (موسوعة بسماكة ٥ سنتيمترات). وأخيراً تشتمل خريطة خلايانا على ٣ مليارات من "الحروف"، أي ما يعادل ١٠٠٠ موسوعة بمعدل ١٠٠٠ صفحة للواحدة يصل ارتفاعها إلى ٥٠ متراً (بناء من٢٠ طبقة).

تنقسم الكائنات الحيّة إلى عالمين كبيرين: الحيوانات والنباتات. ويتميز كل واحد عن الآخر بنمطه الخاص في التغذية. تتغذى الحيوانات على النباتات أو الحيوانات الأخرى، هي لا تصنع غذاءها بنفسها بل تكتفي بالحصول عليه من الخارج. لذلك نسمّيها **غيريّة الإغتذاء** ***hétérotrophes***. في المقابل، تحوّل النباتات، بفضل الكلوروفيل (اليخضور)، الطاقة الضوئية للشمس إلى طاقة كيميائية تُستعمل في صناعة الأغذية والوقود التي تفيدها في صيانة تفاعلاتها الحيويّة: فهي إذن **ذاتية الإغتذاء** ***autotrophes***.

وإذا كان من السّهل أن نصنف كلباً ضمن عالم الحيوان وشجرةً ضمن عالم النبات، فإنّنا نحتار في أن نُلحق بإحدى هاتين الفئتين كائنات مثل **الأوّلانيّات** التي تتصرّف تارة كالحيوانات وطوراً كالنباتات. أمّا


المقياس المرجعي
المقياس الحقيقي
١٧٠٠ كلم
إنسان
١,٧٠م
١ كلم
برغوث
١م
١٠٠م
متناعلة (باراميسيوم)
١٠٠ ميكرون
١٠م
خليّة
١٠ ميكرون
١م
بكتيريا
١ ميكرون
١٠سم
فيروس
١٠٠ نانومتر
١سم
بروتين
١٠ نانومتر
١م
جزيئات
١ نانومتر
١/١٠٠م
ذرّة
٠,١ نانومتر

الفيروسات فما زال الجدال قائماً بين بعض العلماء لمعرفة ما إذا كانت تُعتبر جزيئات كيميائية معقّدة أو أنّه يجب تصنيفها بين الكائنات الحيّة.

وهناك خاصّية أخرى مهمّة جداً لهذه الأحياء المجهريّة البدائية تميزها عن الحيوانات والنباتات العليا: فهي تتكون فقط من وحدة شكليّة بدائية منفردة، **الخليّة**، وهي عبارة عن قطرة مجهريّة من الهلامة الحيّة. ومع ذلك، تجدر الإشارة إلى أنّ كلّ الكائنات العليا المكوّنة من ملايين المليارات من هذه الخلايا، تمر أيضاً بمرحلة الخليّة الأحادية: وذلك أثناء التوالد الجنسي. من ناحية أخرى، تملك جميع خلايا هذه الكائنات، مهما بلغت من التعقيد والتخصص، بِنية مشابهة لأكثر **الأَوّلانِيّات** بساطة. لذلك، يجب أن نصب اهتمامنا أول الأمر على الأحياء المجهرية وحدها.

الأَوّلانِيّات: حيوانات أم نباتات؟

استعمل جوبلوت Joblot، تلميذ فان لووينهوك Van Leeuwnhoek، في تجاربه على الأحياء المجهرية نقيعَ التبن. ولذلك عرفت الكائنات المجهرية التي تظهر بكميّة كبيرة في مثل هذا السائل **بالنُقاعيات**. وبما أنّ طولها يقارب ربع المليّمتر ، فمن الممكن بقليل من العناية ملاحظتها بالعين المجردة. وقد رأيناها إذن تتنقل بسرعة في جميع الاتّجاهات. وإذا كنّا نملك مجهراً، يمكننا أن نكتشف سبب هذه الحركة: أهداب تهتزّ بسرعة كبيرة منتشرة حول "جسم" الكائن الدقيق. هذه النقاعية المهدّبة تسمّى مُتناعلة (بnaraميسيوم).

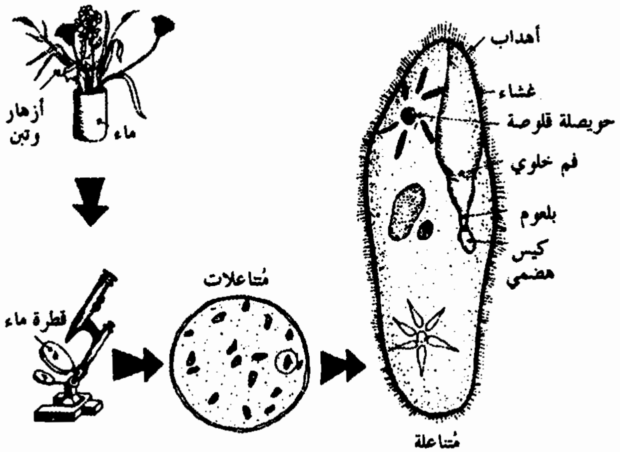
تكون الخليّة الكبيرة والوحيدة التي تمثل "جسم" الحيّ المجهري مستقلة تماماً. وهي تتحرك بوسائلها الخاصّة، وتلتقط وتهضم وتتمثل الفرائس الحيّة - بكتيريا أو طحالب أحادية الخليّة أو أوّلانِيّات أخرى - التي تجدها في الوسط المحيط. تتّجه هذه الفرائس بواسطة أهداب نحو "فم" خلوي. أما الأطعمة التي تمر عبر الغشاء الذي يحيط بالخليّة، فإنها تنتقل على طول نوع من

البلعوم بواسطة غشاء متموّج. أخيراً، تنتهي الرحلة بهذه الأغذية في أكياس صغيرة تحتوي على مواد هضمية.

خلال عملية الهضم، تنجرف هذه الأكياس بحركة من **السيتوبلازما** ـ وهي مادة شفّافة تملأ الخليّة من الداخل ـ وتُثقب، في نهاية المطاف، أمام فتحة تخرج منها الفضلات.

تحتوي السيتوبلازما المتناعلة كذلك على نواتين بحجمين مختلفين جداً تتضمّنان "الخريطة" الجزيئية الضروريّة لإنتاج كامل الفرد. كما تحتوي على حويصلتين قلوّصتين، تلعبان دور "القلب" البدائي، فتنتفخان بالماء في نسق موزون وتخرجانه بالتناوب، وتؤمّنان بذلك في كامل جسم "الحيوان" دوران فيض سائل قادر على جرف الفضلات الكيميائية.

يتوالد هذا الكائن الصغير بالانقسام إلى اثنين وذلك لعدة مرّات في اليوم. ويكون معدّل تكاثره كبيراً لدرجة أن نسل كائن واحد قد يشغل بعد شهر ـ إن لم تتدخل الآليات المُنظّمة ـ حجماً يعادل مليون مرّة حجم الشمس. ولهذا السبب ندرك الآن لماذا كانت النقائع



والمغليات التي كان يرصدها علماء الطبيعة في القرن السابع عشر تعجّ بعد بضعة أيام بالحياة المجهرية.

ترسم المتناعلة صورة للكائن الحيّ أحادي الخليّة الأكثر تطوّراً بين كل الكائنات التي نعرفها. وهذه الخليّة البدائية استطاعت أن تحقّق بمفردها الوظائف الضرورية لحركتها وهضمها وتمثّلها وتوالدها التي لا يمكن للكائنات الحيّة العليا أن تنجزها بدون مساعدة أنسجة متكوّنة من مليارات الخلايا ومجمّعة في أعضاء متطوّرة.

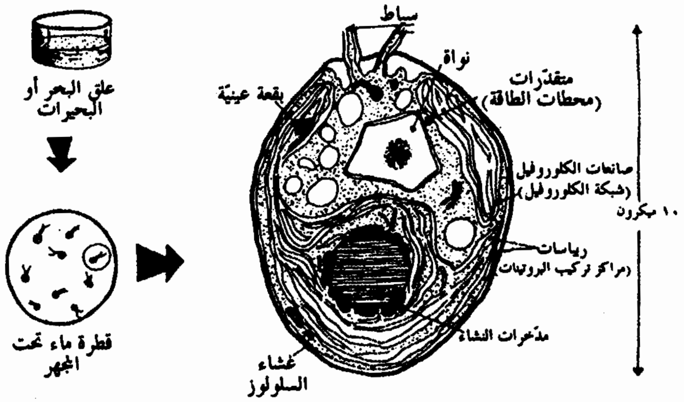
تُعتبر الطحالب المُسوّطة *flagellés* نوعاً آخر من الكائنات المجهريّة الأكثر انتشاراً والموجودة بكثرة في الماء. تتنقّل المُتَناعِلَة بمساعدة الأهداب. أمّا المُتَلَحّفَة *chlamydomonas* (اسم لأحد هذه الطحالب المجهرية) فتتحرك بنشاط شديد بفضل سوطين صغيرين يضربان الماء باتجاه الأمام.

يكون حجم المُتَلَحّفَة أصغر بكثير من حجم المُتَناعِلَة: إذ لا يتعدّى طولها عشرات الميكرونات، ولكن في هذا الفضاء المحدود نجحت الطبيعة في تركيز كل ما يحتاجه هذا الكائن الصغير للبقاء والتكاثر. فضلاً عن ذلك، فأعضاؤه الداخليّة، الموجودة داخل السيتوبلازما، لا تقلّ أهميّة عن تلك الموجودة في جسمنا كالمخ أو الكبد أو الكلى.

هذه الأعضاء الصغيرة (ونسمّيها عُضَيّات *organites*) هي:

- المتقدّرات *mitochondries*، وهي معامل طاقة صغيرة جداً، تؤمّن تحويل الطاقة الغذائية إلى طاقة تستغلّها الأحياء المجهرية؛
- صَانِعَةُ الكلوروفيل *chloroplaste*، وتحتوي على الكلوروفيل الضروريّ لتخليق المواد المُغذّية؛
- الريباسات *ribosomes*، وهي مراكز تركيب البروتينات، أي المركّبات الأساسية للحياة؛
- النواة التي تتكثف في وسطها، كما هو الشأن بالنسبة للمُتَناعِلَة، في شكلٍ كيميائي مرصوص (هو شكل الحموض

النوويّة(*)) ـ "الخريطة" الجزيئيّة الضرورية لتكاثر كامل الكائن الحيّ وتخليق المركّبات الكيميائية التي يحتاجها.



المتلحّفة

إن وجود اليخضور والسلّولوز يجب أن يسمح لنا بتصنيف هذه الطحالب بدون لُبْس بين النباتات. ومع ذلك، وعند وضع هذه الطحالب في العتمة، فإنها تتغذى مثل أيّ حيوان على المواد العضوية المُستمدة من الوسط.

تتميّز الطحالب مثل الحيوانات أيضاً بالحركيّة. فهي تنتقل نحو مصدر ضوئيّ ضعيف بفضل بقعة حسّاسة للضوء تعتبر بمثابة "عين" أثرية حقيقية. وإن أضفنا إلى هذه الخصائص المدهشة أنّ طحلب المُتَلَحِّفَة يستطيع أن يتكاثر جنسياً (يوجد في الواقع جنس مذكّر وجنس مؤنّث)، لأدركنا إلى أيّ حدّ يكون هذا الكائن الصغير، المختلف عن الإنسان في الحجم وفي "الماضي" البعيد جداً، قريباً منه بفضل الوظائف التي ينجزها.

(*) من النواة.

أحجام مقارنة

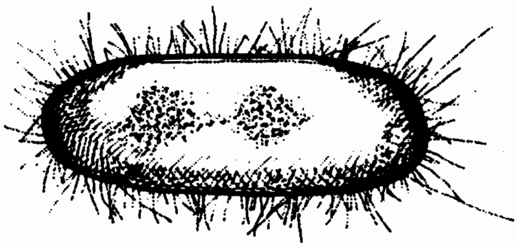
البكتيريا: عبيد وحلفاء خفيّون

إنّها "جراثيم" باستور أو حُوَيْنات فان لووينهوك. مع البكتريا ـ أكثر الكائنات الحيّة بساطة والتي تكون الوحدة الأساسيّة والمورفولوجيّة فيها هي الخليّة ـ نصل إذن إلى حدود ما اتفقنا على تسميته الحياة. بالكاد تبلغ أبعاد هذه البكتريا بضعة ميكرونات، ولكن الأشكال التي تتخذها تتميّز بتنوّع مذهل: عصيّات وكريّات وخَرَزات وفواصل وضُمّات وحلزونات.

وكما بيّن باستور، تتكاثر البكتيريا في كلّ مكان: في الهواء الذي نتنفسه، وفي الماء، وفي الأرض، وفي أجسامنا حيث تكوّن مثلاً النبيت الجرثومي المعوي. وهي غالباً ما تمثل، بالنسبة للإنسان، مساعدين كيمائيّين ضروريين يحقّقون، من بين ألف مهمّة أخرى، تطهير المياه المستعملة في مَصافي مياه الصرف وتحويل الخمر إلى خلّ. وبما أنها مرافقة قيّمة لكل وسائل التطهير، فهي تحوّل الفضلات العضوية للنباتات إلى دُبال خصب أو تحلّل جثث الحيوانات إلى مواد بسيطة، مفسحة المجال أمام المعالجة الدائمة للمكوّنات الأساسيّة التي تحتاجها الكائنات الحيّة. وفي وقتنا الحاضر، تستطيع البكتيريا بعد أن تغيّرت من قبل الإنسان بفضل تقنيات الهندسة الوراثية (انظر ص ٢١٧)، أن تتحوّل إلى مصانع مجهريّة مبرمجة تُعتبر بمثابة قواعد للتقانات البيولوجيّة والصناعة البيولوجية على حد سواء.

ولكن البكتيريا قد تشكل أيضاً عوامل لأمراض خطيرة (كالخُناق والكوليرا والكُزاز). فبفضل قدرتها التغذويّة والتكاثرية الخارقة، فهي تعرّض ـ رغم حجمها الصغير جدّاً ـ للخطر "مجتمع الخلايا" الذي هو جسدنا. وفي الواقع، فإن البكتيريا تنتج ذيفانات (سموم) *toxines* تخلّ بوظائف الجسم.

تكون بعض أنواع البكتريا قادرة على تَمثّل المواد الكيميائية مباشرة، وتتمكّن أنواع أخرى من صنع غذائها عن طريق التخليق الضوئي. كما يستطيع بعضها الآخر، كذلك، أن يسحب الطاقة من بعض تفاعلات الاحتراق الداخلي، ويقدر عدد آخر منها على التعايش مع الكائنات الحيّة ويوفّر لها بالتالي بعض الفوائد. وبفضل العُصيّة القولونيّة للمِعَى، أي **الإشريكيّة القولونيّة** *Escherichia coli*، سنتمكّن من إجراء دراسة تشريحية للبكتيريا.



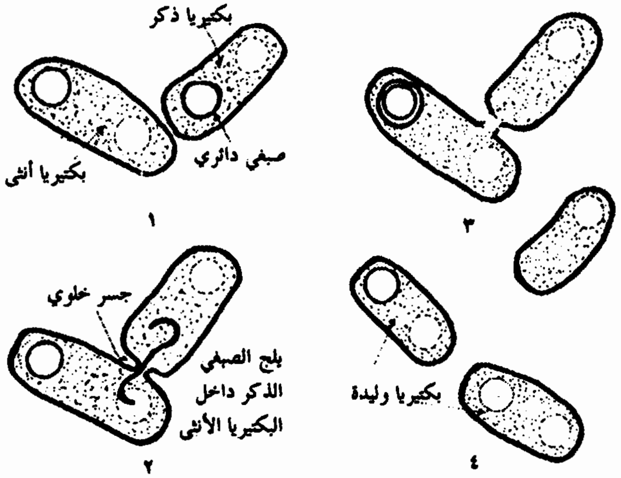
عصيّة القولون– الإشريكيّة القولونيّة

لخليّة الإشريكيّة القولونيّة شكل عُصيّة يبلغ طولها ٢ إلى ٣ ميكرونات وقطرها ٠,٨ ميكرون. وعن طريق رصدها بالمجهر الإلكتروني، يمكن أن نلاحظ وجود غشاء مغطّى بمادّة هلاميّة.

داخل البكتيريا، لا نتبيّن عضَيّات محدّدة بدقة كالمتقدّرات أو صانعات الكلوروفيل أو النواة. وتكون مجمل المادة الوراثية فيها

مقتصرة على صبغي واحد يتكون على الأرجح من خيط دائري طويل من الحمض النووي يبلغ طوله، إن تمكّنا من بسطه، مليمترا واحداً تقريباً (يعتبر ضخماً مقارنة بأبعاد البكتيريا) ويتكوّم في شكل كتلة منتشرة ومتجمّعة بالمنطقة المركزية.

تتكاثر البكتيريا عموماً بواسطة انقسام بسيط إلى جزأين (كل عشرين دقيقة بالنسبة للعُصيّة القَولونيّة). مع ذلك، يبدو مبهراً ظهور مثل هذه الكائنات البدائيّة جداً والتي لها أيضاً طريقة جنسية للتكاثر. ذاك ما يبيّنه الرسم أدناه (لدى **الإشريكيّة القولونيّة**).



تزاوج البكتيريا

نتبيّن إذن بوضوح أهميّة هذا الحمض النوويّ، الذي يشترك في نفس الطبيعة والتركيبة الكيميائيّة الكليّة (رغم أنّ له "رسالة" مختلفة) مع الحَمض الذي نجده في نواة المتناعلة أو في نواة طحلب **المتلحّفة**. كما أنّنا سنجد أنّ هذا الحمض هو مكوّن أساسيّ للفَيروسات.

تُقبِل البكتيريا "الذكور" على "الإناث" (١). يُحقَن الصِبغي

"الذكر" ببطء في جسم البكتيريا "الأنثى" بواسطة جسر خلويّ (٢).

يدوم "التزاوج" ساعتين تقريباً بحيث يندمج الصِبغي "الذكر" في الصِبغي "الأنثى" (٣). تنقسم البكتيريا "الأنثى" إلى وليدتين اثنتين وتكون لكلّ واحدة منهما صِبغيّات خاصّة بها (يمكن أن تكون هذه البكتريا "إناثاً" أو "ذكوراً") (٤).

الفيروسات: غزاة الخلايا

تمثّل الفيروسات حالة على حدة. أهي كائنات حيّة أم أنّها لا تمثّل سوى جمعاً معقّداً لجزيئات قادرة على أن تنسخ بعضها بعضاً إلى ما لا نهاية ضمن وَسَط ملائم؟ وهي تحظى، بأيّة حال، بخصائص جدُّ نادِرَة.

في عام ١٩٣٥، اندلعت ثورة حقيقيّة في الآراء عندما نجح عالم الكيمياء الأميركي، و. م. ستانلي W. M. Stanley في بلورة فيروس سرنج التبغ mosaic du tabac(*). عندئذ، ظهر هذا الفيروس على شكل إبر لمّاعة صغيرة جدّاً يمكن رؤيتها بالمجهر العادي، مِثل كلّ البلّورات التي اعتاد الكيميائيّون رصدها في مخابرهم. فإذا وضعت بلورات الفيروس في قارورة بمعزل عن الرطوبة، فإنها ستحتفظ كملح المطبخ الشائع، من غير أن تُظهر أبداً خصائص يمكن أن تشبّهها بالكائنات الحيّة: فهي لا تتحرّك، ولا تتكاثر، ولا تتمثل مواد غريبة، ولا تعيش. ومع ذلك، ورغم عمليات التبلّر المتتالية يستردّ هذا المسحوق الكيميائي المذاب في الماء **كامل قدرته على العدوى**. ولو وضعنا قطرة من هذا المحلول على ورقة تبغ خضراء، فلن تتأخّر النبتة في إظهار عوارض العدوى لأنّ الفيروس يتكاثر فيها بسرعة مذهلة.

إثر هذه الاختبارات، يبدو الفيروس على أنه أكثر الكائنات الحيّة فطرية، عند التخوم بين ما هو جُزَيئيّ وما هو حيّ: أي في أصل

(*) داء فيروسي يصيب نبات التبغ.

الحياة ذاتها. لذلك، لم يكن ليبدو مستحيلاً، في الواقع أن يتكون الفيروس صدفة وأن يبعث الحياة، بالتطوّر، في عالم الأحياء بأسره.

والحال أنّ الفيروس لا يستطيع أن يتكاثر دون تدخّل الخليّة الحيّة التي يتطفّل عليها. وبما أنّه يحتاج إلى الحياة لكي يتكاثر، فهو لم يستطع، نظريًا، أن يسبقها. أمّا إذا استطاع هذا الفيروس، على غرار الكائنات الحية العليا، أن يتكاثر ويقوم بتخليق جزيئاته الخاصّة به عن طريق ظاهرة التَمثّل، فسيكون عاجزاً في المقابل عن **تحويل الطاقة بطريقة ذاتية**، وهو ما تقوم به جميع الكائنات الحية المتكوّنة من خليّة واحدة أو من عدّة خلايا. هكذا يكون الفيروس نوعا من الطفيليات وقد تحوّل إلى أبسط تعبير عنها.

سيساعدنا الفيروس خاصّة في تكوين معرفة أشمل بالمواد الأساسية للحياة التي بالكاد قابلناها في الصفحات السابقة: **البُروتِينات والحموض النووية** كونها مركّبات كيميائية معقّدة وذات أهميّة جوهرية للفهم الجيّد للظواهر التي تخصّ الحياة وأصلها.

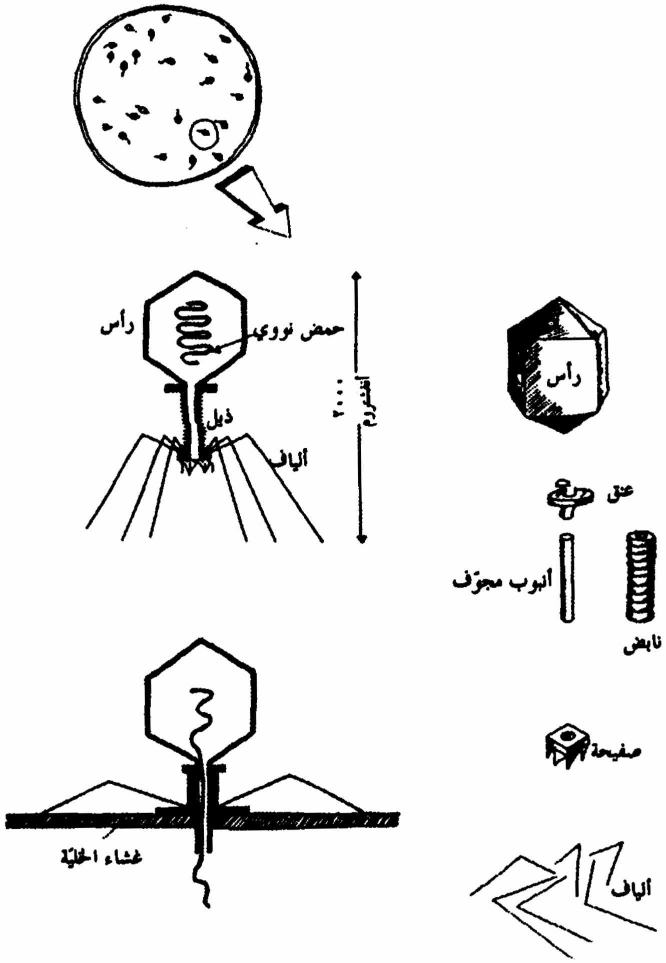
يصل حجم أكبر الفيروسات إلى ٣٠٠ نانومتر وأصغرها إلى ١٠ نانومترات. وبناء عليه، فإننا لا نستطيع مراقبة بنيتها إلاّ بواسطة المجهر الإلكتروني.

ورغم أن أشكال الفيروسات عديدة، فإنها تشترك عموماً في نفس التكوين الأساسي: "قشرة" خارجية واقية مكوّنة من جُزيئات عِملاقة من البروتينات هي بمثابة "اللبنات" التي تُصنَع منها جميع الكائنات الحيّة، و"نخاع" داخليّ مكوّن من خيط طويل ملتفّ من **الحمض النوويّ** يحمل المعلومة الجينيّة.

فلنراقب عن كثب بنية فيروسين اثنين: العاثية(*) *bacteriophage* وفيروس السيدا المرعب.

للعاثية T_2 شكل شُرغوف: "رأس" مقعّر يتضمّن جزيئاً طويلاً

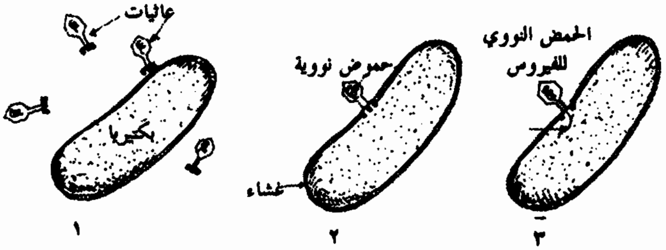
(*) العاثية لغوياً هي "آكلة البكتيريا"، أو قُلْ مجازياً إنها "جرثومة الجراثيم". فهي تتطفل على البكتيريا وتقتلها.



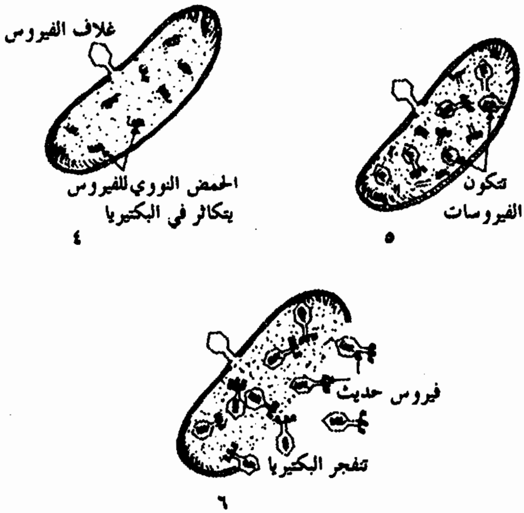
العاثية T_2

من الحمض النوويّ (ملتفّ على الأرجح ٣ مرات حول نفسه) و"ذيل" مقعّر أيضاً، محاط بنوع من النابض اللولبيّ. يتكوّن مجمل هذا الجزء الخارجي، وكذلك الألياف المَدودة، من البروتينات. وتكون "خريطة النسخة" الموجودة في "الرأس" دقيقة جداً بحيث

يحتاج الأمر إلى خيط طوله حوالى ٦٠ ميكروناً كي تُسجّل عليه جميع التعليمات الأساسية لصنع فيروس آخر.



لا يستطيع الفيروس أن يتكاثر إلاّ في داخل خليّة حيّة. ويمثل ذلك أوجُ التطفّل، إذ إن الفيروس سيتكل على الخليّة التي يهاجمها حتّى يضمن تكاثره. ويبيّن الرسم كيف يُهاجم الفيروس T_2 بكتيريا الإشريكيّة القولونيّة، الضيف الألوف لأمعائنا، ويقتلها.



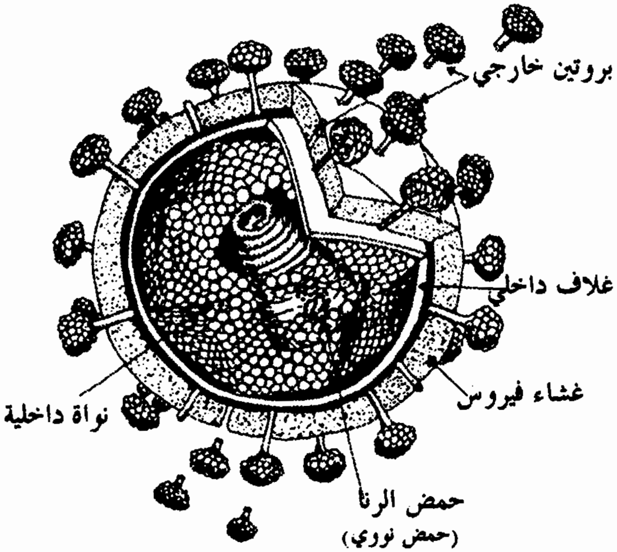
تطوّق الفيروسات T_2 البكتيريا (١). ينخر أحدها الغشاء الواقي للبكتيريا بمساعدة "ذيله" المقعّر (٢). وبواسطة هذه الحقنة الحقيقية، يحقن الفيروس T_2 خيط الحمض النووي الخاصّ به في البكتيريا (٣).

هكذا يفرض على البكتيريا أن تستعمل مراكز التركيب التي تفيدها عادة في تجديد موادها الخاصّة بها لصنع البروتينات والحموض النوويّة التابعة لفيروس T_2 دون التحوّل عن المخطط المفروض (٤ ـ ٥). تنفجر البكتيريا مطلقةً مئات النسخ من الفيروس الأصلي. وهذه الفيروسات ستتولى بدورها جلب العدوى لأفراد أخرى من البكتيريا (٦).

يُعرَف فيروس السيدا (الذي عُزل في بداية سنة ١٩٨٣ على يد لوك مونتانييه Luc Montagnier ومساعديه من معهد پاستور) بفَيرُوس **نقص المناعة البشرية** *Human Immunodeficiency Virus* (HIV). ويشبه هذا الفيروس نعماً بحرياً، يبلغ قطره ١٠٠ نانومتْر (أي ١٠ سنتيمترات بالمقياس الاستدلالي). فإذا وضعنا ألف فيروس في صف واحد ووضعنا ألف صف الواحد بجانب الآخر لتشكّل مربع من مليون فيروس، ثم كدّسنا أخيراً ألف مربّع الواحد فوق الآخر لتشكل مكعّب، فسيبلغ ضلع هذا المكعّب الصغير عُشر الملّيمتر وسوف يكون بالكاد مرئياً بالعين المجرّدة! يتكوّن غلاف فيروس نقص المناعية البشرية من طبقة مضاعفة من الشّحم (جُزيئات دهنية) ومن نوعين من البروتينات (يسميان GP120 وGP41) ويشكل اثني عشر مضلعاً خماسياً وعشرين مضلعاً سداسياً "مذروزة" الواحد بالآخر مثل كرة القدم. تشكّل هذه البروتينات براعم تظهر كالشوك على سطح الفيروس. أما بنية النواة المركزية التي تكون بشكل كوز الصنوبر فإنها معروفة بدرجة أقل. وهو يحتوي على الحمض النووي الذي يُمكّن الفيروس من التكاثر.

يُعتبر فيروس السيدا آلة جهنّميّة. فهو يتكاثر في العديد من

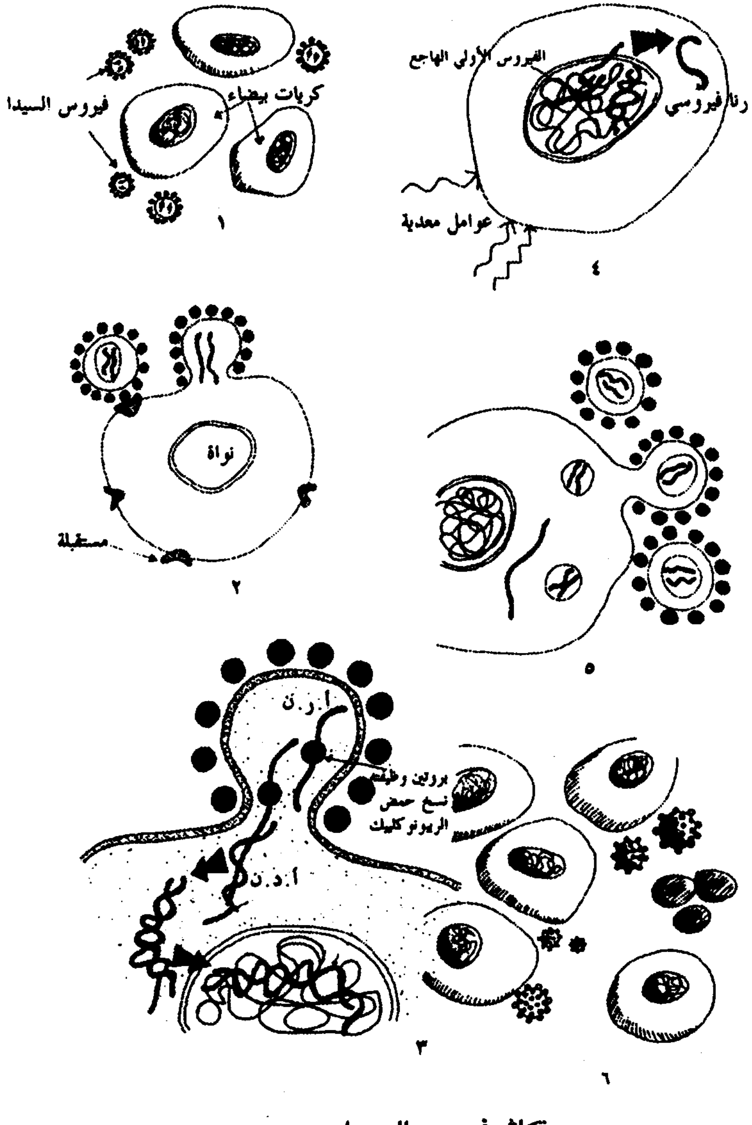
كريّات الدم البيضاء الأساسية في الدفاع عن جسمنا ضدّ البكتيريا أو الطفيليات أو الخلايا السرطانيّة أو الفيروسات الأخرى التي تهاجمه باستمرار. ويستطيع فيروس نقص المناعة البشرية الاندماج في حَمْض الدنا ADN الموجود في النواة والبقاء هناك في حالة سبات. فإن حدثت عدوى أخرى، "يستيقظ" الفيروس. وهكذا تموت الكريات البيضاء المهاجَمة، تاركة خلايانا دون حماية أمام الجراثيم الغازية، الأمر الذي يفسّر ظهور الأمراض المرعبة الناتجة عن فيروس السيدا.



فيروس السيدا

يبين الرّسم التالي المراحل الأساسية للعدوى الفيروسيّة وتكاثر الفيروس داخل الخليّة.

يتكاثر فيروس السيدا داخل الكريّات البيضاء. تهاجم الفيروسات الكريات البيضاء (١). يتعلّق أحدها بمُستقبلة الخليّة المُستهدَفة ويُدخِل حمضه النووي داخل الخليّة (٢). ينسخ أحد بروتينات



تكاثر فيروس السيدا

الفيروس حَمْض الريبونوكليك (الرنا) إلى حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك (الدنا) الفيروسي الذي يندمج في النواة حيث يمكث في حالة سبات (٣). وتحت تأثير العوامل المُعدية (بكتيريا أو فيروسات أخرى)، تستيقظ آليّة التكاثر (٤). تفلت الفيروسات المتكوّنة في الخلية بالتبرعم (٥)... وتهاجم خلايا أخرى تُقتَل بدورها. تُستأنف الدورة، وتُهدم أجهزة دفاع المناعة(٦).

نكتشف إذن القدرة العجيبة لتضاعف الحمض النووي، ونفهم أيضاً لماذا يعرّض غزو الفيروسات الكائن العضوي لمثل هذا الخطر[١].

إثر هذه الإلمامة السريعة عند تخوم الحياة، سنرصد معلومات تكفي لإبراز الخطوط العريضة التي تميّزها.

خصائص الحياة

إن تركنا جانباً الفيروسات؛ تلك الكائنات الحيّة الناقصة، دعونا نراجع بسرعة السبل التي بواسطتها تظهر الحياة؟[٢]

ـ **التفرّد**: جميع هذه المخلوقات الصغيرة هي كائنات محدّدة بغشاء؛ وهي تُكوّن جميعها كلاً واحداً يتمثل بوحدة حيّة مستقلة.

ـ **التغذية**: تبقى الكائنات على قيد الحياة بامتصاص أو بصنع الأطعمة التي تحتاجها لتنمو وتحافظ على تفاعلاتها الحيويّة، تكون هذه الأغذية متمثّلة، أي أنّها تصبح المادّة ذاتها الذي اغتذى عليها الكائن الحيّ.

ـ **التنفس ـ التخمُّر**: تُحوِّل الكائنات، عن طريق تفاعلات الاحتراق البطيء، الطاقة الغذائية إلى طاقة تستطيع أن تستعملها الخليّة.

---

(١) زكام، إلتهاب الكبد، الجدري، إلتهاب سنجابية النخاع، الهربس هي أيضاً أمراض فيروسية.

(٢) لا تمثّل الخصائص التي قمنا بتعدادها سوى تعريفاً فظاً جداً للحياة. ذلك لأن التعريف الوافي، على المستوى الكيميائي الفيزيائي، لخاصية "الحياة" صعب التحديد للغاية.

- **التكاثر**: تستطيع جميع الكائنات الحيّة أن تعطي نسخاً مطابقة لها، وتكون آليّات الانقسام تحت سيطرة الحموض النوويّة.
- **التطوّر**: تستطيع الكائنات الحيّة أن "تتطوّر" عقِب آليّة الطفور والانتِقاء الطبيعي.
- **الحركة**: تتنقّل بعض الأحياء المجهرية بواسطة الأهداب أو السِياط بحيث يكون هذا التنقل متناسقاً.
- **الموت**: إن قمنا بوضع الفورمول في قطرة ماء تتطوّر فيها كائنات أُحاديّة الخليّة، سينقطع كلّ نشاط ومن ثمّ تموت الكائنات.

ينشأ كلّ من يحيا على كوكبنا عن الأحياء المجهرية التي كانت موضوعَ بحثنا حتى الآن. وبطبيعة الحال، تظهر إثر التطوّر البيولوجي خصائص أخرى: الشمّ أو الغَريزة أو الإدراك التأمّلي. لكن العيش يأتي قبل الإحساس أو التفكير، **ولذلك فهدفنا هو أن نعيد تتبّع أصل الحياة البدائية وطريقة عملها**.

يبدو إذن أنّ الوظائف الثلاث الأساسية للكائنات الحية تتلخّص في:

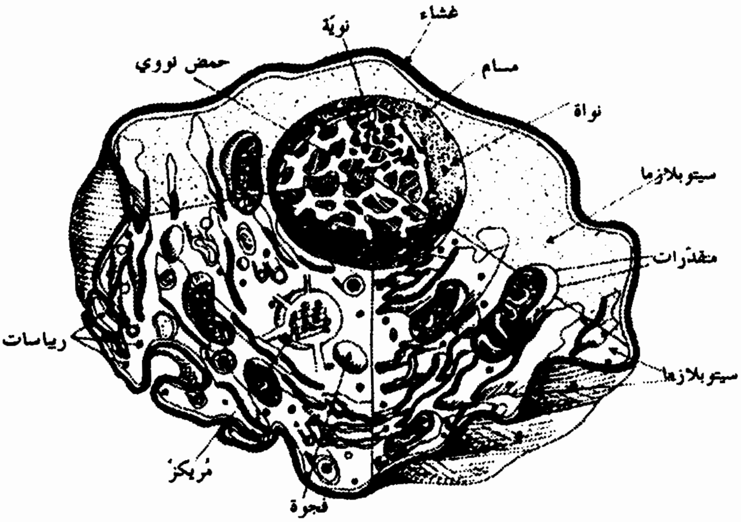
١ - إمكانية **البقاء على قيد الحياة** بواسطة التغذية، والتمثّل، والتفاعلات الطاقيّة للتنفس والتخمير؛

٢ - إمكانية **امتداد الحياة**، بفضل التوالد؛

٣ - إمكانية **تدبير الذات** بتنسيق جميع التفاعلات الجماعيّة ومزامنتها وتنظيمها والسيطرة عليها.

ولكي نتفادى أيّما لُبس، وبما أنّ هذه الوظائف ترتبط بالبكتيريا قدر ارتباطها بالإنسان، فلنعمّم أكثر ونسمي هذه الوظائف: الحفظ الذاتي، والتوالد الذاتي، والتنظيم الذاتي.

إن البنية الأوّليّة القادرة على تحقيق هذه الوظائف الثلاث الأساسية هي الخليّة الحيّة؛ فهي المكوّن لكل كائن حيّ، سواء كان جرثومة أو إنساناً، والوحدة الأوليّة للحياة الحيوانية أو النباتية. الخليّة الحيّة هي مجتمع من الجزيئات. وهذه الوظائف الثلاث الأساسية



بنية خليّة حيّة

للحياة تصبح مستحيلة دون شبَكة الاتّصال التي تدمجها وتنظّمها. فمن دون الاتّصال داخل الخلايا وفيما بينها ، لن يكون للحياة وجود.

أما ركائز هذا الاتّصال فهي الجزيئات الحاملة للمعلومات والتي تعمل كإشارات، والهرمونات هي مثال على ذلك. فهذه الإشارات يتم اكتشافها والتعرف إليها بواسطة مُسْتقبِلات تطلق بدورها تفاعلات تسمح مثلاً، بتخليق الجزيئات التي تحتاجها الخليّة، أو بتوالد هذه الأخيرة أو بتنقّلها. وتحتلّ البروتينات مكانة مميّزة داخل شبكة الاتّصال هذه. وهي تلعب بالطبع في غالب الأحيان دوراً لافاعلاً باعتبارها لبنات أو مواد بناء هذه الخلايا، ولكنها عندما تقوم بصنع جزيئات أخرى أو بتغييرها أو بالتعرف إليها، فإنّها تلعب دوراً فاعلاً. إنها تمارس وظيفة محدّدة (نوعاً من "المهنة"). وفي هذه الحالة، تتولّى الأنزيمات (وهي عدّة أدوات الخلية وكيميائيوها الذين لا

يكلّون) أو الأضداد حمايتنا من الغُزاة (جراثيم، فيروسات).

ورغم وجود أنواع عديدة من الخلايا، فإن شكلها التشريحي الأساسي يتضمن دوماً: غشاء، يؤمّن فرديّتها ويفصلها دون أن يعزلها عن العالم الخارجي، وسيتوبلازما وهي عبارة عن هُلام بروتيني شفاف يحوي أعضاء الخلايا (متقدّرات، صَانِعي الكلوروفيل. . .)، ونواة تحتوي على المادّة الوراثية.

وعلاوة على كونها الجسيم الأساسي للحياة، فإن الخليّة هي أيضاً مصنع حقيقيّ على الصعيد الجّزيئي. ففي جسدنا ما يقارب ستين ألف مليار من الخلايا مُجمّعة في مائتي فصيلة متميّزة. تكون تَارة مرتبطة بالأنسجة: كخلايا الكبد (مصنع كيميائي) وخلايا العضلات القادرة على التقلّص وخلايا القلب التي تخفق بانتظام وخلايا الدماغ (عَصَبونات)، وعوامل الاتصال، وخلايا الشبَكِيّة (الحسّاسة للضَوء) وخلايا الجلد. وتكون طوراً مستقلّة وقادرة على التنقّل: مثل كريّات الدم الحمراء والبيضاء ، البلاعم، النِطَاف أو البُيَيْضات، والخلايا الجنسية.

هكذا، يُمكن أن تشبيه جسدنا بمجتمع من الخلايا التي تتواصل فيما بينها بواسطة الهرمونات والأعصاب وجهاز المَناعة. ولكي نفهم الحياة، يجب أن نخترق قلبها، أي أن ندخل إلى الخلية بحد ذاتها، ذلك الكوكب الغريب في عَالم الأشياء المتناهية في الصغر. . . .

- ٣ -

كيف تعمل الخليّة ؟

بعد أوّل اتّصال مع الحياة، **على المستوى المجهريّ**، لننفذ إلى داخل الخليّة ذاتها، **على المستوى الجزيئي**، حتى نكتشف في "رحلة إلى مركز الحياة" أسس العمليات الحياتية.

كيف تتحوّل خليّة كائن متطوّر (أو الخلية الوحيدة لفرد من الأوّلانيات) وتستعمل الطاقة التي تساعدها على البقاء؟ ما هو الرمز الجيني الموجود في الجزيء الضخم للحمض النوويّ؟ هل يمكن فكّ رموزه؟ كيف يمكن للخليّة أن تدير وظيفتها الخاصة؟

عديدة هي المسائل التي لا بد من التطرق إليها حتّى نرسم "صورة تقريبية" للكائنات المنقرضة التي وسمت فجر الحياة.

فإذا حققنا الوصلة ما بين عالم البيولوجيا وعالم الكيمياء، سيكون من السهل علينا لاحقاً إعادة رسم الظهور التدريجي لأولى الخلايا الحيّة التي وهبتها الطبيعة خصائص الحفظ الذاتي والتوالد الذاتي والتنظيم الذاتي، من أشكالها الأبسط إلى أشكالها الأكثر تعقيداً.

الحفظ الذاتي والشمس

إن الوظيفة الأصلية لجميع الكائنات الحيّة هي تلك التي تسمح لها بضمان وجودها الذاتي. لذلك، تتصرّف هذه الكائنات "كمحوّلات طاقة" حقيقية موصولة باستمرار بمصدر خارجي هو الشمس. ولإبراز مجمل عمليات الحفظ الذاتيّ التي تضمن استخراج

وتصريف واستعمال الطاقة الشمسية في العالم الحيّ، نستعين بالصورة التالية، صورة الاقتصاد العام لبلد ما. فكيف يمكن للخليّة أن توازن "ميزانيتها الطاقية".

فلكي يضمن كل كائن حيّ، حتى أصغر جرثومة معروفة، بقاءه على قيد الحياة، لا بد أن يقوم باستمرار **بتحويل** الطاقة والاقتصاد في **استعمالها**. إن مصطلح الحفظ الذاتي لا يعني شيئاً آخر. فالخليّة بنية منظّمة شديدة التعقيد. ومثلما تستلزم السيارة عناية دائمة، ومراقبة وتصليحات منتظمة، ينبغي على الخليّة أيضاً أن تحافظ باستمرار على بنيتها التحتية من التدهور الحتمي الذي يفرضه الزمن عليها. والحال أنه إذا كانت العناية بالسيارات تقتضي وجود ميكانيكيين، فيجب أن تكون الخليّة هي الميكانيكيّ الذي يخدم نفسه بنفسه. إنه شيء محتوم لحياتها، ولذلك يحظّر عليها عدم الحراك لأن ذلك يؤدي إلى هلاكها نهائياً.

ما هو إذن هذا القانون القاسي الذي يريد لجميع البنى المنظّمة أن تكون محكومة بعدم التنظيم والفوضى؟

ثمة مقارنة تعطينا مزيداً من الفهم: فالغرفة التي يعيش ويشتغل فيها إنسان عازب تملك نزعة طبيعية للفوضى. إذ تكون فيها الكتب والأوراق متناثرة على الأرض، والملابس ليست في مكانها داخل الخزائن، والفراش غير مرتب، وطبقة الغبار كثيفة فوق الأثاث والأرض. لكن الخزانة لا تترتب من تلقاء نفسها....، وكلّ منا يعرف مقدار **الطاقة** التي يجب بذلها لتنظيم كل شيء، خاصّة إذا مّر وقت طويل عليها. **إن إعادة التنظيم تتطلب ثمناً باهظاً من الطاقة**. وكلما كانت المنظومة أكثر تنظيماً أو ترتيباً (كالخليّة)، زادت كمية الطاقة التي تحتاج إليها **للحفاظ على تنظيمها ضدّ النزعة الطبيعية للفوضى**. فهذه الطاقة يجب أن تنفذ باستمرار إلى داخل المنظومة التي لا تلبث، في غيابها، أن تتفكّك.

هكذا فإن القانون الذي يحكم التبادل الطاقيّ يعمل على تردي

أيّة بنية منسّقة فيوجهها، مرحلة بعد مرحلة، إلى مستوى أدنى يُلغى عنده أي اختلاف في الطاقة أو في الشكل وفق تناسق كوني شامل.

وفيما تتواصل هذه التسوية اللاعكوسة، تزداد قيمة إحدى الكميات الفيزيائية المجرّدة التي يسميّها الفيزيائيون **الأنتروبيا** *entropie* أو **القصور الحراري**. تقيس الانتروبيا درجة "تنكّس" أو "استعمال" الطاقة، وكذلك درجة الفوضى في بنية منظّمة(*).

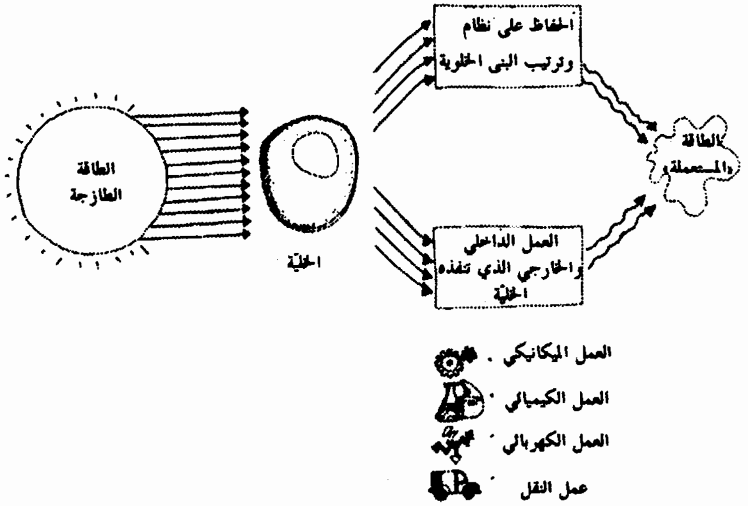
لمقاومة مفعول الأنتروبيا ـ الطاقة "المستعمَلة" ـ وتفادي هذه التسوية الطاقيّة التي تعني الموت، تكون الخليّة إذن بحاجة دائمة إلى الطاقة "الطازجة". يتم الحصول على هذه الطاقة باستمرار من الخارج في شكل أغذية، وهذا ما يفسّر السبب الذي يجعل كل كائن حيّ - حتى أبسطها ـ مُلزماً بأن يتغذّى.

تحتاج الخليّة أيضاً إلى الطاقة لكي تقوم **بعمل** ما. هكذا، فعندما تتحرّك بواسطة السياط أو الأهداب، وعندما تتقلّص، فهي تنفّذ عملاً **ميكانيكياً**. وخلال التراكيب الكيميائية الداخليّة، أو عند توصيل تيّارات كهربائيّة ضعيفة، أو عند نقل مواد عبر غشائها، تقوم الخليّة بعمل **كيميائي** أو **كهربائي** أو بعملية **انتقال**.

وعلى المدى الطويل تقريباً، تتولّد الطاقة الموجودة في الأطعمة التي تمتصّها أو تصنعها الكائنات الحيّة من **الشمس** أساساً. والأطعمة هي نوع من الطاقة الشمسيّة المحفوظة. وبدون الشمس تستحيل الحياة على **الأرض**. ولكن بأي شكل تصل تلك الطاقة إلى الأرض؟

ترسل الشمس باستمرار في الفضاء المحيط إشعاعاً نطلق عليه اسم الإشعاع **فوق البنفسجي** أو **الضوء** أو **الحرارة**، ولكنه في الحقيقة ذو طبيعة فريدة: إنه **الإشعاع الكهرمِغنطيسي**. ينتشر هذا الإشعاع في

(*) هذا القانون الأساسي يُعبّر عنه بالمبدأ الثاني للديناميكا الحرارية (أو مبدأ كارنو): فالمنظومة معزولة - أي التي لا تتبادل مع الوسط لا المائدة ولا الطاقة - والبعيدة عن حالة التوازن، تتطور بحيث ترتفع معه درجة الأنتروبيا الخاصة بها. تتناقض الحياة بوضوح مع هذا المبدأ.



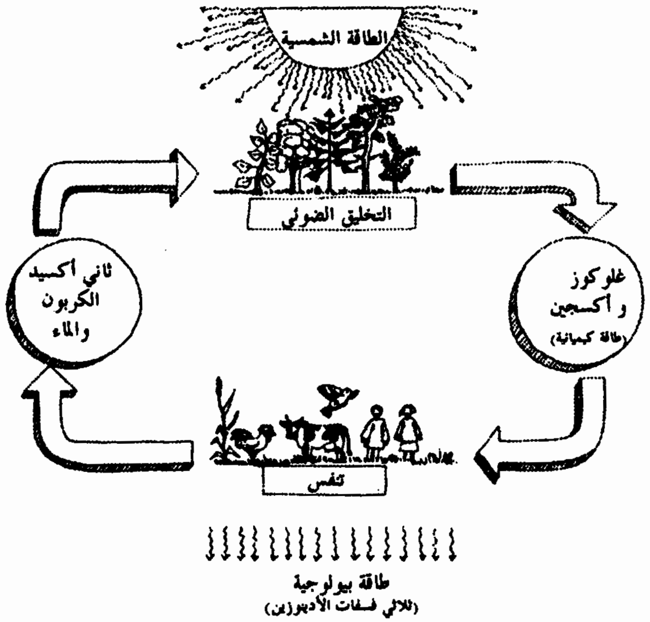
إستعمال الخليّة للطاقة

الفضاء الفارغ بسرعة كبيرة جداً(*). ويحتوي، بحسب طول موجته وتردّده، على **كمّية معيّنة من الطاقة القابلة للاستعمال**. توجد هذه الطاقة في شكل "حُزم" صغيرة نسميها **فوتونات**. وعندما نتواجد أمام مصباح كهربائي أو موقد أو جهاز إرسال راديوي، نكون عرضة لأن نُقذف بأعداد هائلة من الفوتونات. وكلما كان طول موجة الإشعاع قصيراً، كانت كمّية الطاقة التي يحملها الفوتون كبيرة.

إن سلك التوصيل هو إذن دفق الطاقة الذي ترسله الشمس. وهذا التدفق يصل إلى أرضنا بشكل فوتونات تنخفض طاقتها القابلة للاستعمال من فوق البنفسجيّة إلى الإشعاعات الحراريّة.

يكون لشكل "اقتصاد" الأشعّة الشمسية في عالم الأحياء شكل

(*) تُقدّر سرعة الضوء بـ ٣٠٠٠٠٠ كلم في الثانية في الفراغ. تمثّل المسافة التي يجتازها الضوء في سنة (ضوئية)، ١٠ بليون كلم تقريباً.



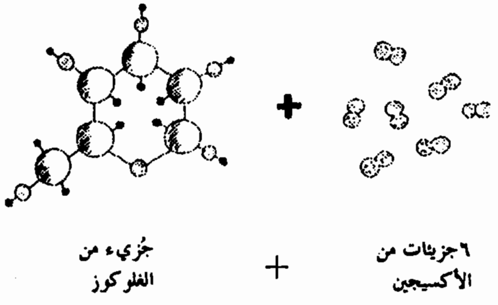
دارة مغلقة على نفسها، تخضع الحيوانات والنباتات بداخلها لبعضها البعض. تشتمل هذه الدارة على مرحلتين أساسيتين.

ـ المرحلة الأولى هي تحويل طاقة الشمس الضوئية إلى طاقة كيميائية. بمعنى آخر، تُحفظ الطاقة الكهرمغنطيسية للفوتونات في الروابط الكيميائية لمركّب معروف جداً هو الغلوكوز. هذه العملية، المسماة **التخليق الضوئي**، تطلق غاز الأكسجين في الفضاء. وهي تكتمل عموما في الخلايا المتخصصّة للنباتات الخضراء، ولكن كما رأينا سابقا، فإن بعض الكائنات الدقيقة البدائية مثل **طحلب المتلحّفة** *Chlamydomonas* كانت قد عملت على تحقيقها.

ـ خلال المرحلة الثانية، "يحترق" الغلوكوز الذي يلعب دور الغذاء، بوجود الأكسجين في خلايا الحيوانات والنباتات. هذا الاحتراق "البارد"، المُسمّى تنفساً، يوفِّر الطاقة القابلة لأن تُستعمل

مباشرة من الخليّة بشكل "قطعة نقود صغيرة". هذه القطعة المتداولة هي الوقود الداخلي الذي تستعمله جميع الكائنات الحيّة بدون استثناء. يسمى هذا الجزيء الهام جداً ثُلاثِي فُسْفاتِ الأدِينُوزِين (ATP) *adenosine triphosphate*. أما نواتج التنفس فهي أكسيد الكربون والماء.

لهذا السبب لا تستطيع الحيوانات والنباتات أن تعيش من دون بعضها البعض. تعطي النبتة الغلوكوز والأكسجين ـ عوامل التنفس الأساسية ـ في حين يبعث إليها الحيوان بثاني أكسيد الكربون كونه مصدر الكربون المعدني الذي انطلاقاً منه تصنع النبتة الخضراء المركّبات العضويّة التي تحتاجها.

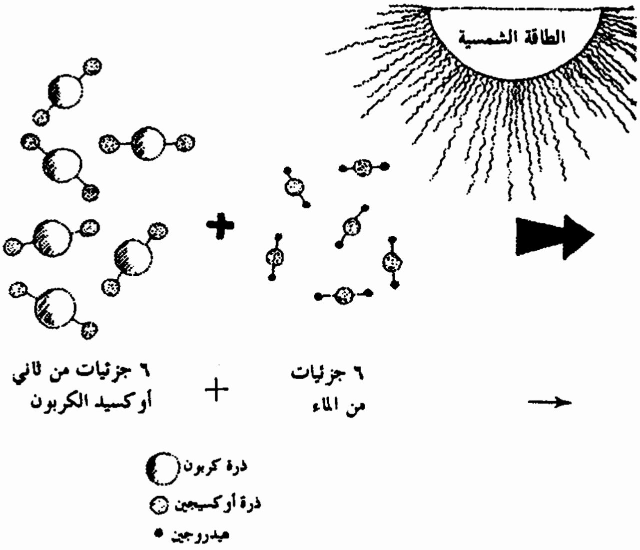


يحدث كلّ من التخليق الضوئي والتنفّس على حدة في عضو محدد جيداً من الخليّة. وهذان العضوان الأساسيّان اللذان تتشابه بنيتاهما في عدة أشياء، سبق أن لاحظنا وجودهما لدى الكائنات أحاديّة الخلية. ونقصد بهما **صانعة الكلوروفيل** مقرّ التخليق الضوئي، **والمتقدّرة** مقرّ التنفس. ورشتان جزيئيتان داخل مصنع خلويّ.

الشمس المحفوظة:

تتمثل المرحلة الأولى بالتخليق الضوئي الذي بواسطته، وانطلاقاً من ثاني أكسيد الكربون والماء والطاقة، تَصنع الخليّة النباتية مادة الغلوكوز(*).

إن **ثاني أكسيد الكربون**، مادّة إنطلاق التخليق الضوئي، هو جزيء يحتوي على ذرّة كربون وحيدة. إنّه عنصر البناء الذي يساعد الخليّة في صنع - مثل لعبة الميكانو الكيميائيّة - المركّبات العضوية المعقّدة التي تحتوي على الكثير من ذرّات الكربون.



الماء هو مصدر الإلكترونات (الذي يمثل نوعاً ما "المسامير" التي تسمح بتثبيت قطع الميكانو فيما بينها) وأيضاً مصدر غاز **الأكسجين**.

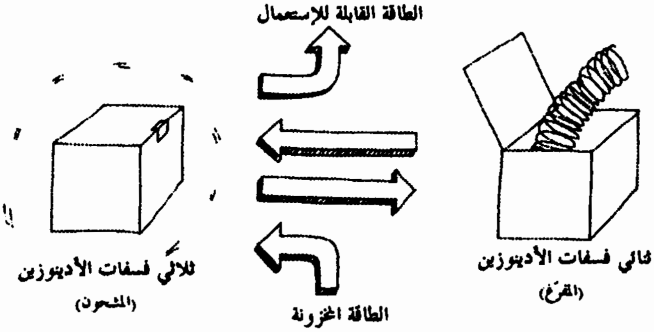
أما **الغلوكوز**، الناتج عن التفاعل، فهو جزيء أكثر تعقيداً

(*) ليست نواتج التخليق الضوئي مقتصرة على الغلوكوز، ولكنها تتضمن أنواعاً أخرى من السكر والشحوم والحموض الأمينية ومركبات مختلفة تصنع انطلاقاً من مواد معدنية آزوتية تستمد من التربة. غير أنه يمكن اعتبار الغلوكوز على أنه الناتج الأهم لعملية التخليق الضوئي.

يتكوّن هيكله من ستّ ذرّات من الكربون.

من ناحية أخرى، وبمساعدة نفس تلك الطاقة الشمسية، تقوم الخليّة النباتية "بشحن بطارياتها". والعامل الأساسي لذلك "الشحن" الخلوي هو جزيء غنيّ بالطاقة: **ثُلاثِي فُسْفاتِ الأَدِينُوزِين** (ATP) *adénosine triphosphate* كونه الوقود الكوني للحياة.

يمكن تشبيه ثُلاثِي فُسْفاتِ الأَدِينُوزِين بنابض مضغوط قابل للتخلّي بسرعة عن الطاقة التي يحبسها عند تمططه دفعة واحدة. يتمثّل النابض المضغوط بثُلاثِي فُسْفاتِ الأَدِينُوزِين، وهو جزيء "مشحون"؛ بينما يتمثّل النابض الممدود **بثُنائِيُ فسفات الأدينوزين** (ADP) *adénosine diphosphate*، وهو جزيء "مفرّغ". يدلّ كلّ من ثُلاثِي فُسْفاتِ الأَدِينُوزِين وثُنائِيُ فسفات الأدينوزين على الهيكل الكيميائي للجزيء ويشيران إلى المكان الذي يوجد فيه مخزون الطاقة. وهذا ما تظهره مجموعة الرسوم في الملحق رقم ١.



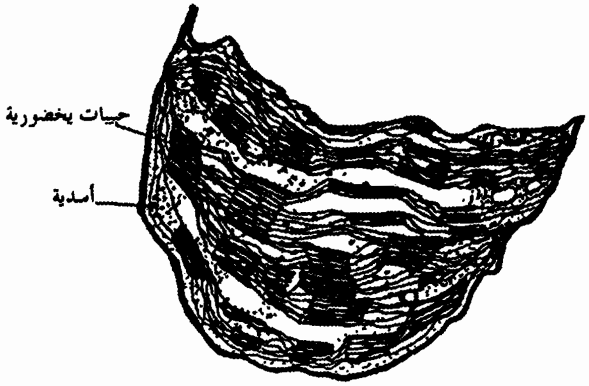
يتمثّل الحفّاز الأساسي للتركيب الضوئي بصباغ أخضر هو جزَيْء **الكلوروفيل**. ولكي نحدد بصورة أفضل وضع الكلوروفيل في ورشة الجزيئات، أي صانعة الكلوروفيل، ولكي نحسن وضع صانعة الكلوروفيل بدورها في الخليّة النباتية، يمكننا أن نبدأ بما يسهل إدراكه

بالملاحظة (شجرة مثلاً) والنزول، درجة درجة، إلى مستوى الجزيئات (انظر الرسم في ص ص ٥٨ ـ ٥٩).

يبقى الآن أن نجيب عن الأسئلة التالية: بأي كيفية يتم تصنيع الغلوكوز؟ كيف يُشحن ثُلاثِي فُسْفاتِ الأَدِينُوزِين بثُنائِيُّ فسفات الأدينوزين؟ ما هو دور الكلوروفيل هنا؟

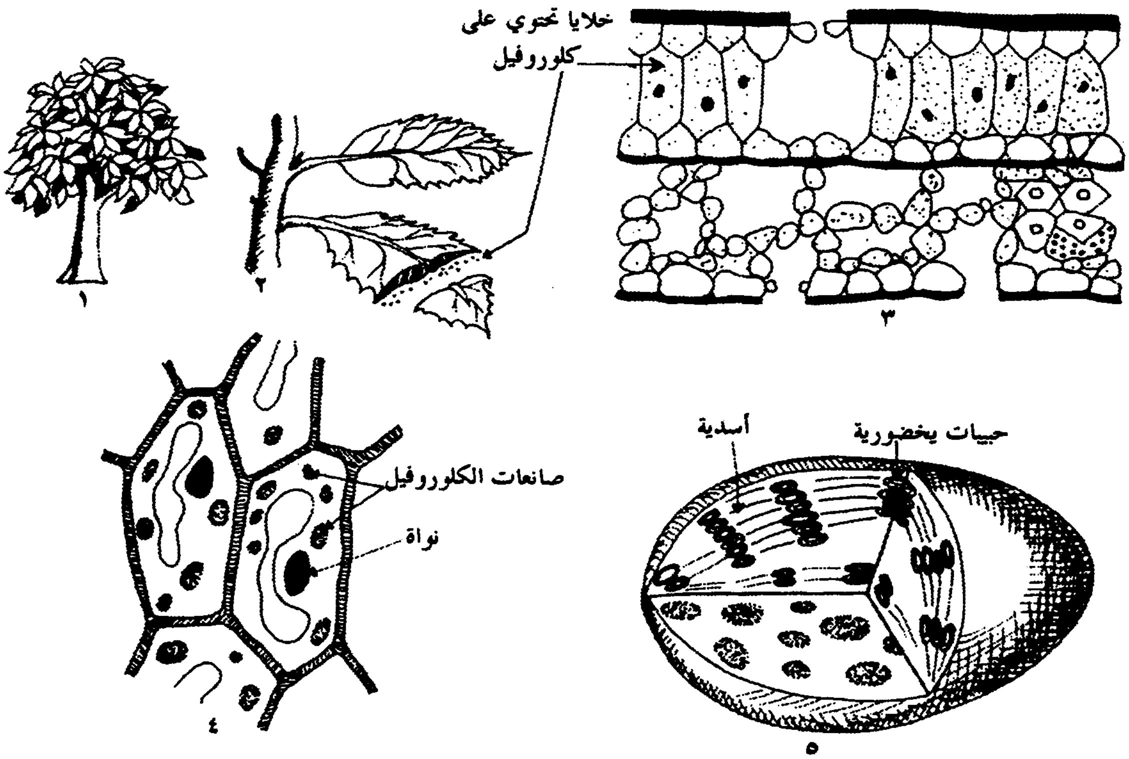
تكون جزيئات الكلوروفيل، المنسّقة بانتظام في صانعة اليخضور، شبيهة بوحدات كهرضوئيّة كهربائيّة صغيرة جداً يمكن أن نعتبرها نوعاً من البطاريات البيولوجيّة. ففي هذه البنية الخاصّة تحدث الآليّة الإلكترونية لتضخيم الطاقة الضوئية. وفي الواقع، يمكن أن تُنقَل إلكترونات الكلوروفيل إلى مستوى طاقي مرتفع إثر اصطدامها بالفوتونات الصادرة عن الشمس. هذه الإلكترونات المُحرَّضة تبدأ بالتخلي تدريجياً عن الطاقة الكامنة التي اكتسبتها وتسمح بالتالي بحدوث التطوّرات الكيميائية للتخليق الضوئي.

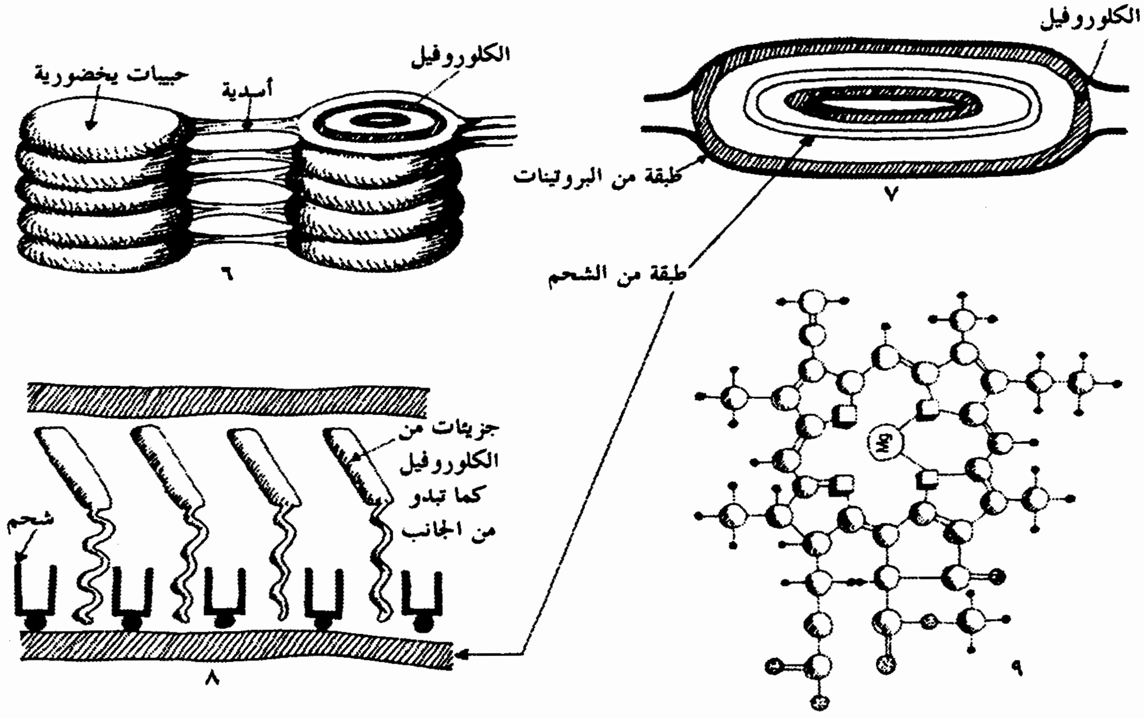
ولكي نفهم هذه الظاهرة بشكل جيد، سنعمد إلى إجراء المقارنة التالية: تحوّل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية أو كهربائية(*).



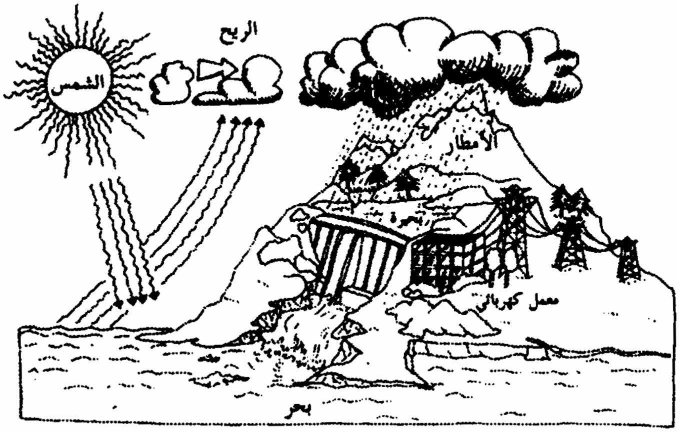
صانعة الكلوروفيل

(*) تستند هذه المقارنة إلى مجموعة الدورة الطاقية للتخليق الضوئي والتنفّس معاً.

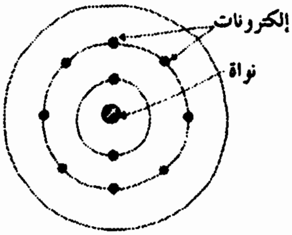

خلايا تحتوي على
كلوروفيل
صانعات الكلوروفيل
نواة
أسدية
حبيبات يخضورية
١
٢
٣
٤
٥


حبيبات يخضورية
أمدية
الكلوروفيل
٦
الكلوروفيل
طبقة من البروتينات
٧
طبقة من الشحم
جزيئات من
الكلوروفيل
كما تبدو
من الجانب
شحم
٨
Mg
٩

تحت تأثير حرارة الإشعاع الشمسي، يتبخر ماء البحر ليكوّن سحبا. تُوجد جزيئات ماء السحب على مستوى طاقيّ أعلى من تلك التي تبقى على سطح البحر: فهي تمثل بذلك الطاقة الكامنة. تُدفع السحب بمفعول الريح ويسقط المطر فوق الجبال. تمثّل بحيرات المرتفعات مخازن للطاقة. كما يمكن أن تصلح السيول لإدارة عجلة (طاقة ميكانيكية). هذه العجلة يمكن أن تسيِّر مولّداً كهربائيّاً. تندفع تيارات الماء إلى البحر: وتعود جزيئات الماء إلى مستوى انطلاقها بعد أن تكون قد تخلّت في طريقها على طاقتها.

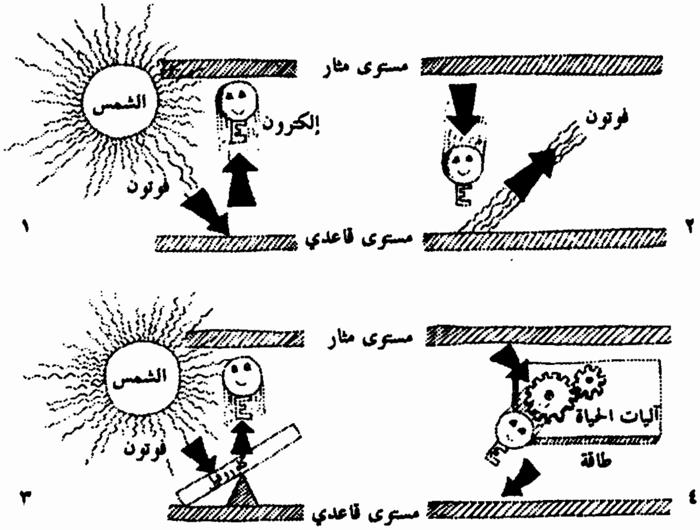


لننتقل الآن إلى المستوى دون الذريّ حيث تحدث قفزات الإلكترونات التي تهمّنا.



تتكون الذرّات من نواة مركزيّة "تدور" حولها جسيمات مكهربة: الإلكترونات. تحتل هذه الإلكترونات مدارات محددة جيداً ومتطابقة مع مستويات مختلفة من الطاقة.

ماذا سيحدث إذا تلقّى الإلكترون كمية زائدة من الطاقة بشكل فوتونات من الضوء أو من الحرارة؟ إنه يقفز فجأة إلى مدار أبعد عن النواة، أي مدار يتطابق مع المستوى الطاقي الأعلى. ولكن، بعد مرور وقت قصير جدّاً، ينزل هذا الإلكترون إلى المستوى الطاقي الأول الخاصّ به معيداً الطاقة التي كان قد تلقاها في شكل فوتون آخر.

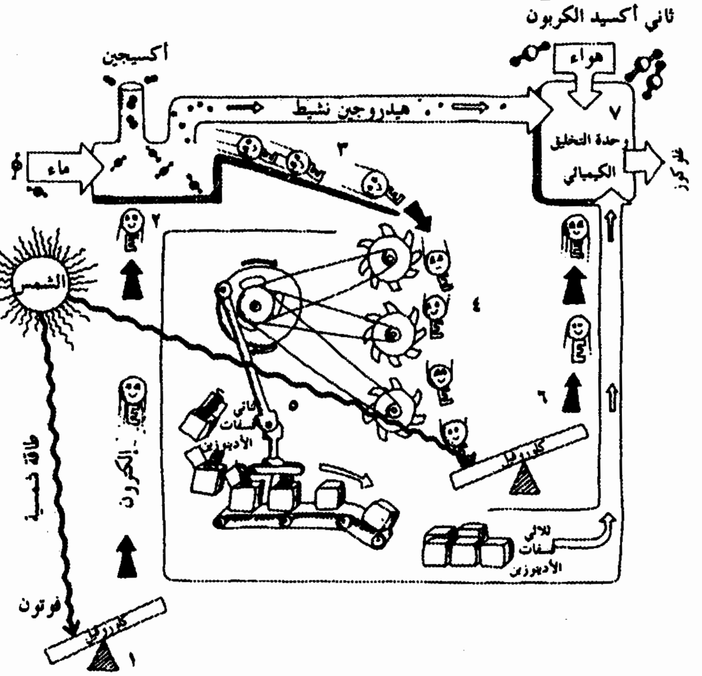


تكون ظاهرة "الحياة" محشورة بين الرسم (١) و(٢) فارضة على الإلكترون أن يسقط ثانية في **آلياته الذاتية**. والواقع أن قفزات الإلكترونات هذه تحدث مرّات لا تُحصى في جزيئات الكلوروفيل المنسّقة داخل صانعة اليخضور. تتكرّر هذه القفزات كلّما كانت الورقة مضاءة

بإشعاعات الشمس أو بأيّ مصدر ضوئيّ آخر. وتتمثل ميزة الكلوروفيل بتسهيل تغيّرات المدار(٣). ومع ذلك فإن طاقة الإلكترونات، المُثارة والراجعة إلى مستوى الانطلاق الطاقي الخاصّ بها، سوف تضيع إن لم تكن الإلكترونات" مجمّعة" في بنيات ملائمة (٤).

بهذا النحو، يستفاد من التيار الكهربائي الضعيف الذي تولّده الالكترونات (مثل السيل في المثال السابق) في توليد الطاقة في شكل يسهل استعماله، في **تخليقات كيميائيّة** على سبيل المثال.

يبيّن الرسم التالي السيرورة الكاملة، ولكن المُختَزَلة جداً، للتخليق الضوئي. كلّ شيء يحدث داخل صانعة الكلوروفيل التي يُرمز إليها "بمصنع مصغّر".



صانعة الكلوروفيل: مصنع للتخليق الضوئي

تحت تأثير الفوتونات الشمسيّة، تنتقل إلكترونات الكلوروفيل إلى مستوى طاقيّ أعلى (١). يستفاد من طاقة هذه الإلكترونات المُثارة، في البداية، لقطع جزيء الماء إلى قسمين(٢). النتيجة: يُطلَق غاز الأكسجين في الجوّ. تجمّع الالكترونات مع الهيدروجين "النشط" بواسطة النواقل الكيميائية(٣).

يتخلّى فيض الالكترونات، المتساقط نحو مستوى طاقيّ أدنى، عن الطاقة تدريجياً لصالح سلسلة من نواقل الإلكترونات (ممثلة بعجلات ذات ريش) (٤).

تستخدم هذه الطاقة في تحريك الآلة الخاصّة بشحن ثُنائِيُّ فسفات الأدينوزين بثلاثي فسفات الأدينوزين (بواسطة المكبس والسير النقّال، الخياليين بالطبع) (٥).

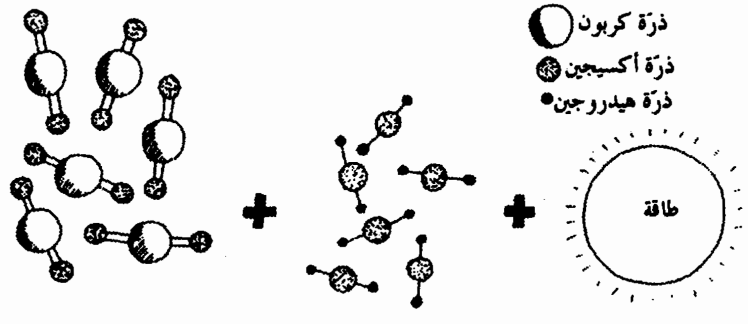
أخيراً، تُستعمل الإلكترونات المُثارة من جديد - بواسطة جزيء آخر من الكلوروفيلِ على الأرجح (٦) - مع الهيدروجين "النشط" وثُلاثِي فُسْفاتِ الأدِينُوزين، في وحدة التخليق الكيميائي (٧). تستخدم هذه الإلكترونات في ربط عناصر البناء المتأتية من ثاني أكسيد الكربون لتكوين جزيء الغلوكوز.

تتطلّب مثل هذه الآلية وقتاً معيناً وأجهزة معقّدة. فلنترك أولاً النباتات تقوم بعملها حتى نسعد فيما بعد بأكل هذه النباتات أو الحيوان الذي أكلها! تستخرج خلايا الحيوانات الطاقة الموجودة في جزيء الغلوكوز، بطريقة التنفس، وهي المرحلة الثانية في دورة الطاقة الشمسية عبر عالم الأحياء.

غلاّية الخلايا:

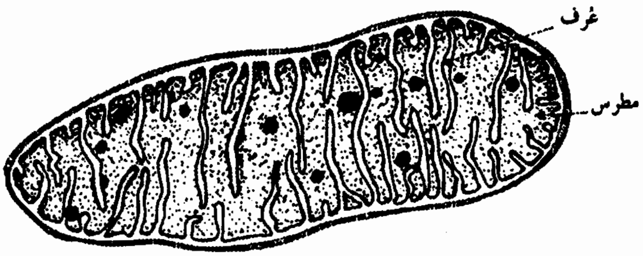
التنفس هو إلى حدّ ما عكس التخليق الضوئي: "يحترق" الغلوكوز بوجود الأكسجين فيعطي الماء وثاني أكسيد الكربون ويحرّر كمّية هامة من الطاقة.

تُخزن الطاقة الناتجة بمعظمها في شكل ثُلاثِي فُسْفاتِ الأدِينُوزين بطريقة مماثلة لطريقة التخليق الضوئي، ويتمّ ذلك باستعمال نفس

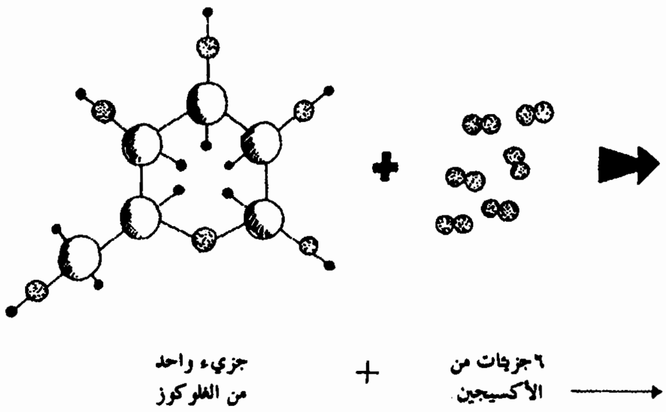


السلاسل الناقلة ونفس أنواع التفاعلات.

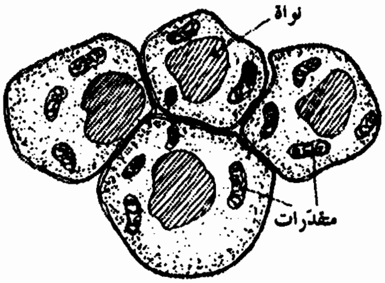
وخلافاً للاعتقاد السائد عموماً، فإن التنفّس لا يحدث عند مستوى الرئتين أو الخَياشيم ولكن عند مستوى الخلايا وحتّى عند مستوى الجزيئات، وذلك في عُضَيّات متخصّصة هي المتقدّرات. ولدى الحيوانات العليا، تُنقَل الأغذية(*) والأكسجين إلى مستوى الخلايا بواسطة الدوران. أمّا لدى الكائنات البدائيّة، فإن الماء المحيط هو الذي يحمل المواد المغذية والأكسجين الذائب. ولكن، في كلتا الحالتين، تصل المواد المغذية والأكسجين الذائب إلى المتقدّرات، وهي المعمل الطاقي الحقيقي للخليّة.



(*) تخضع الأغذية التي تتغذى منها الحيوانات لطور تحضيري مستقلّ عن التنفس هو الهضم. تُقطع الجزيئات الضخمة (بروتينات، شحم، سكّريات) بواسطة بروتينات هضمية خاصة هي الأنزيمات.

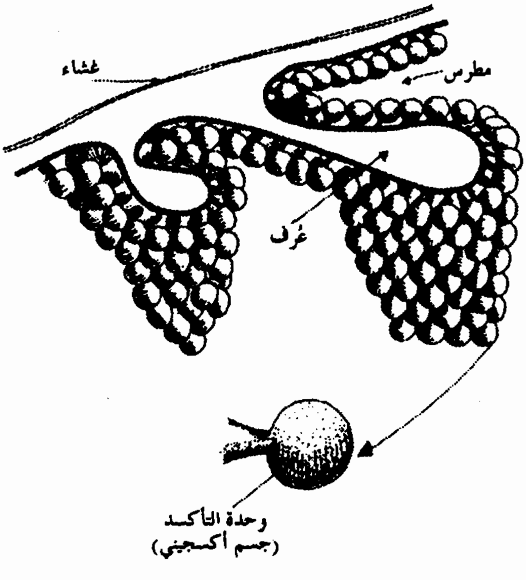


تنتمي تلك المتقدّرة، المكبّرة كثيراً، إلى نفس نوع الخليّة التي تمّ وصفها سابقاً. وفيها تظهر الثنايا التي يكوّنها الغشاء الداخليّ، وتسمى أعراف المتقدّرات.



خلايا حيوانية

يعتبر الغلوكوز أحد المواد الأساسية للهضم. أما تأكسجه فهو الذي يمكن اعتباره تطوّراً نموذجياً.



تتمثّل الوظيفة الثلاثية للمتقدّرات أوّلاً في انتزاع الالكترونات التي تنتمي إلى الروابط المُوحّدة لذرّات الكربون والهيدروجين والأكسجين في جزيء الغلوكوز(أي أكسدة ذاك الجزيء). يلي ذلك تمرير سيل الالكترونات هذا من مرحلة إلى أخرى حتّى يصل إلى المستوى الطاقي الأساسي: الماء. وأخيراً استعمال الطاقة بعد إنتاجها

لشحن ثُنائِيُّ فسفات الأدينوزين بثُلاثِي فُسْفاتِ الأَدِينُوزِين.

تتحقق الوظيفة الأولى بواسطة **المطرس** matrix الموجود بداخل المتقدّرة، فيما تُكتمل الوظيفتان الثانية والثالثة داخل **الغشاء** نفسه.

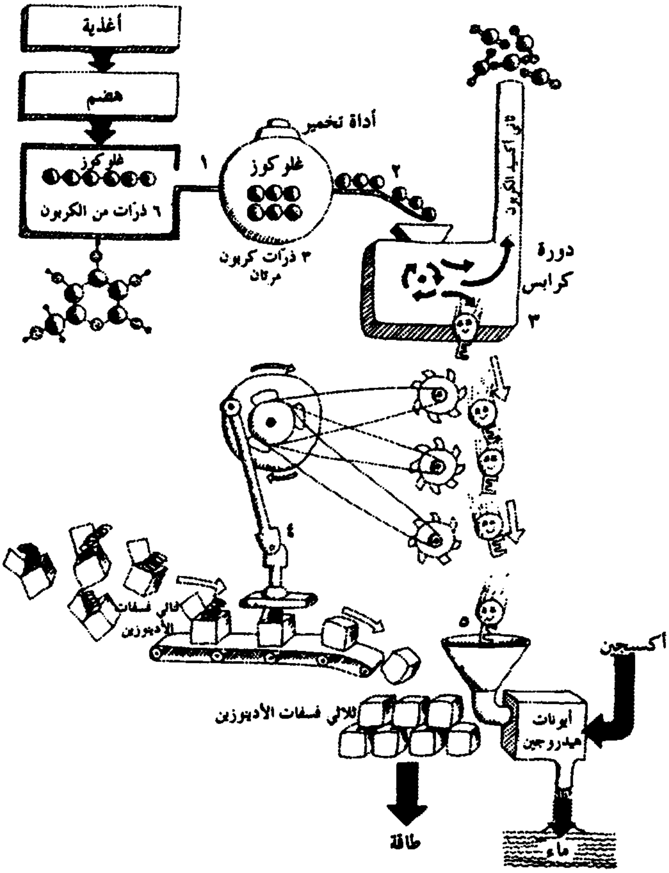
يمكّن الرسم أدناه من توضيح مختلف مراحل هذا التطوّر.

يخضع الغلوكوز الناتج عن الهضم لعملية تحضير تتألف من ١١ مرحلة، تحصل بأكملها بغياب الأكسجين. إنّه تفاعل مماثل للتخمير يطلق عليه اسم **تحلّل السكّر** *glycolyse*(*). في نهاية هذه العملية التي تطلق كمّية قليلة من الطاقة، ينقسم جزيء الغلوكوز الذي يحتوي على ست ذرّات من الكربون إلى قطعتين تحتوي الواحدة على ثلاث ذرّات من الكربون (٢). تُقحم هاتان القطعتان في "آلة طحن الجزيئات"، وهي عبارة عن "طاحونة" طاقيّة حقيقيّة للحياة: دورة كرابس Krebs. من هذه الطاحونة، يخرج ثاني أكسيد الكربون ـ وهو متبق له ذرّة كربون واحدة ـ وإلكترونات غنيّة بالطاقة. وكما حصل في التخليق الضوئي، وإنما بمقياس كبير جداً، تُستعمل طاقة هذه الالكترونات لشحن ثُنائِيُّ فسفات الأدينوزين بثُلاثِي فُسْفاتِ الأَدِينُوزِين (٤) (٥٥٪ من الطاقة المحتواة أصلاً في جزيء الغلوكوز أصبحت الآن موجودة في ثُلاثِي فُسْفاتِ الأَدِينُوزِين).

وفي نهاية المطاف، ترتبط الإلكترونات بالأكسجين الذي يجذب بدوره أيونات الهيدروجين (أي ذرّات الهيدروجين التي تعرّت من إلكتروناتها) لتعطي الماء من جديد (٥). بذلك تكون الدورة قد اكتملت.

إن الطاقة التي يحملها شعاع الشمس المتحدّر من نجم يبعد عنا أكثر من ١٥٠ مليون كلم، تصبح الآن محتبسة داخل المتفجّر

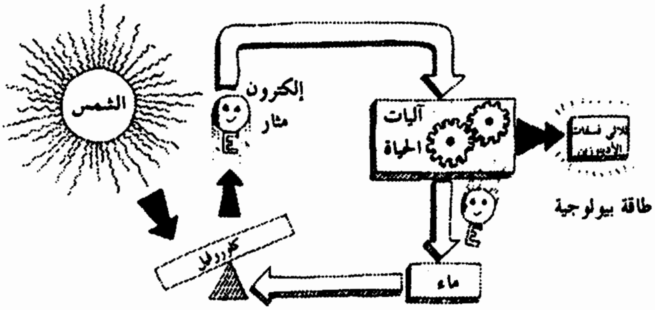
(*) اكتشفه السير هانز كرابس من جامعة مانشستر الإنكليزية والحائز على جائزة نوبل في الطب والفيزيولوجيا عام ١٩٥٣.



المتقدرة: المركز الطاقي للخليّة

البيولوجي الصغير الذي يُسمى ثُلاثِي فُسْفاتِ الأَدِينُوزِين.

فإذا قرّبنا الرسمين السابقين ودمجناهما معاً، ثم أقصينا تخليق الغلوكوز واحتراقه باعتباره العملية الوسيطة، تظهر لنا الدورة الكاملة لدوران الطاقة عبر عالم الأحياء بأكمله ببساطتها المذهلة:



إن الإلكترونات، التي حملتها الفوتونات الشمسيّة إلى مستوى طاقي عالٍ، تعود ثانية وتسقط إلى مستواها الأوّلي متخليّة تدريجياً عبر المنظومة الحيّة عن الطاقة التي "تدير" آليّات الحياة. بذلك تكون الحياة مسيّرة أساساً بالالكترونات. والحال أنّ الالكترون الذي يتجوّل هو، كما رأينا، تيّار صغير. وما يحافظ على الحياة ويقودها هو إذن، كما قال عالم البيوكيمياء الكبير جيورجي A. Szent Gyorgyi بطريقة شاعرية، "تيّار كهربائيّ صغير تغذيه الشمس"!

التوالد الذاتي: أسرار حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك (الدنا)

هكذا يمكن لطاقة الشمس أن تدير الآلة الحيّة. هذا السيل المستمر الذي يعبر الخليّة يسمح لها بأن تضمن حفظ النظام في بناها وأن تقوم بعملها. ومن بين الأشكال العديدة التي يتخذها هذا العمل الخلوي يوجد شكل واحد يكتسي أهمية خاصة: **العمل الكيميائي** الذي يمثّله التخليق الدائم، وسط الخليّة، لجميع الجزيئات الأساسية بالنسبة إليها.

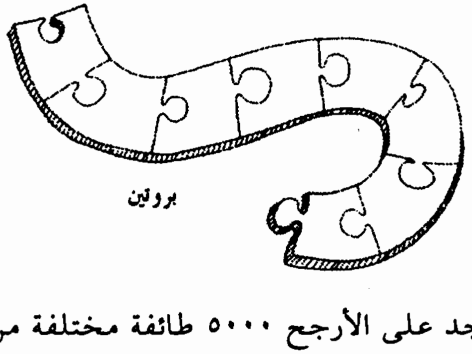
الخليّة هي، فعلاً، مصنع حقيقيّ للجزيئات. هذا المصنع "المعجزة" بإمكانه ليس فقط السهر على استمراره الذاتي بل كذلك

صُنع الآلات الخاصّة به وحتى مشغّلي هذه الآلات! يوافق "التوالد الذاتي" وظيفتين دقيقتين للخليّة، وظيفتين تُنجزان بإشراف **الحموض النووية**. يمكن للخليّة أن تُنتسخ (وبهذه الظاهرة تنتشر الحياة) وأن تراقب بصفة مستمرة استقلابها *métabolisme*(*)، وذلك بتخليق العوامل الكيميائية القادرة على ضبط هذا الاستقلاب: **الأنزيمات** (بروتينات).

لَبِنات الخلايا ومخطّطاتها:

مثلما يُبنى المنزل بالآجرّ والاسمنت، يمكننا القول إن جزءاً كبيراً من الخليّة مكوّن من جزيئات عملاقة هي البروتينات.

تعتبر **بروتينات التركيب** مواد بناء مصنع الخلايا، أمّا البروتينات ـ الأنزيمات، فهي "الكيميائيون" الذين يتولّون تحفيز ومراقبة الآلاف من التفاعلات التي تحدث في نفس الوقت.



يوجد على الأرجح ٥٠٠٠ طائفة مختلفة من البروتينات في الخلايا الحيوانية والنباتية. تقوم كل واحدة منها بدور معيّن. فيما يلي

(*) الاستقلاب هو مجموع التفاعلات الكيميائية التي تحدث في الخلية.

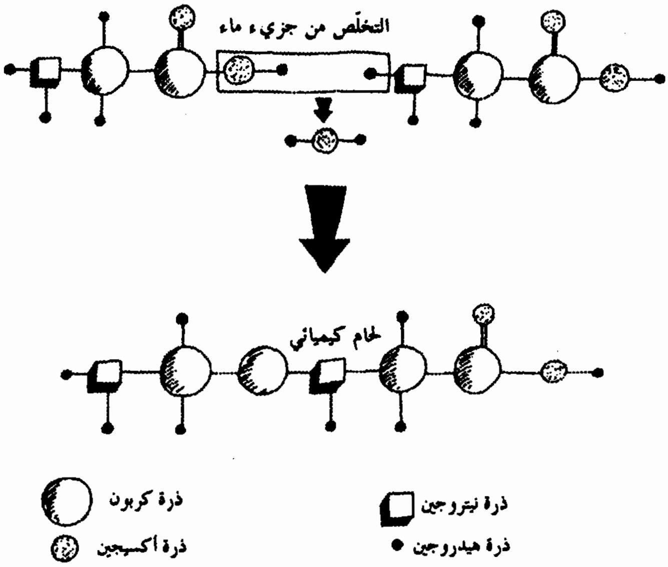
بعض أنواع بروتينات التركيب: كازيين اللبن، وليف الحرير، وقَرَتين الأظافر، والشعر أو الصوف، وزلال البيض. ولكن هناك أيضاً الأنسولين، والكولاجين، والأضداد، والهيموغلوبين، وذيفان سمّ الثعبان. تتكوّن هذه البروتينات، مهما بلغت شدة اختلافها، من نفس العناصر الأساسيّة. وهذه العناصر (جزيئات بسيطة نسبيّاً تحتوي على بضع عشرات من الذرات) تكون مربوطة بعضها إلى بعض كعربات القطار. وتجدر الإشارة إلى أن البروتين النموذجي يحتوي على مائتي جزيء منها.

إن صورة القطار، على فظاظتها الشديدة، ستكون مفيدة لنا. والواقع، أنه قد يكون لكل عربة من عربات القطار وظيفة مغايرة (عربة للبضائع وعربة للركاب وعربة صهريج وعربة للبريد، . . . إلخ. . .) ولكن جهاز ربطها في الأمام والخلف يبقى بالضرورة متشابهاً. وكذلك هو الحال بالنسبة للجزيئات التي تكوّن البروتينات: فلكلّ واحدة شكل ووظيفة مختلفان ولكن "جهاز الربط الكيميائي" **متماثل بالنسبة لها جميعها**. ومن هذا "الجهاز" تستمدّ هذه الجزيئات أسماءها: فنحن نسمّيها **حموضاً أمينيّة** لأن طرفيها، أي **الحمض والأمين**، يتفاعلان الواحد مع الآخر ليعطيا بعد التخلص من الماء رابطاً كيميائياً صلباً (انظر الرسم أدناه).

يوجد لدى الكائنات الحيّة ما يقارب العشرين نوعاً من الحموض الأمينيّة المختلفة(*). وبواسطة هذه الحموض الأمينيّة العشرين، يمكن أن نصنع عدداً هائلاً من "قطارات" البروتينات بنفس الطريقة التي نكتب بها عدداً لا يُحصى من الجمل المختلفة بحروف أبجديّتنا الثمانية والعشرين . إن الترتيب الذي تنتظم بموجبه الحموض الأمينيّة هو الذي يضفي على كلّ بروتين خصائصه الذاتيّة.

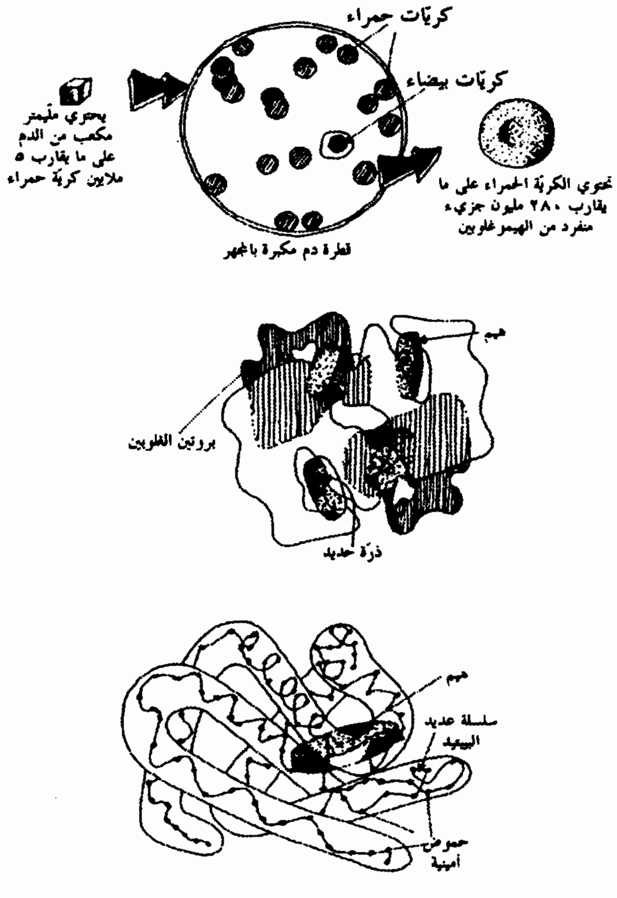
(*) أكثرها تداولاً: الغليسين، الألانين، الفالين، اللوسين، الإيزولوسين، السيرين، التريونين، حمض الأسبارتيك، الأسباراجين، حمض الغلوتاميك، الليزين، الأرجينين، الهيستيدين، التريبتوفان، فينيل الألانين، التيروزين، البرولين، السيتئين، الميثيونين.

وبالفعل فإن ترتيب التعاقب هذا هو الذي يحدد بنية البروتين ثلاثيّة الأبعاد (شكله). وعلى هذه البنية تتوقّف وظيفته.



ما هي البنية الجزيئيّة للبروتين؟ لنأخذ مثلاً: **الهيموغلوبين**.
الهيموغلوبين هو المكوّن الأساسي لكريات الدم الحمراء.
ويتمثل دوره في نقل الأكسجين النقي من الرئتين، مروراً بالأوردة، إلى الأنسجة حيث يتدخّل في عملية التنفس الخلوي. كذلك يساعد الهيموغلوبين في نقل ثاني أكسيد الكربون الناشئ إلى الرئتين بواسطة الشرايين. ولكي نتمكن من تصوّر أبعاده وشكله بشكل أفضل، يمكن أن نحدد منزلته ضمن ترتيب مختلف مستويات التعقيد العضوي.

يتّخذ هذا الجزيء الضخم *macromolécule* للبروتين شكلاً خاصاً ثلاثي الأبعاد يميّز "طائفة" الهيموغلوبين. هكذا يكون لجميع البروتينات بنية جزيئيّة مرتبطة ارتباطاً وثيقاً بعملها. وبما أنّ العناصر الوحيدة التي تكوّن السلسلة هي جزيئات صغيرة من الحموض



من قطرة الدم الى الهيموغلوبين

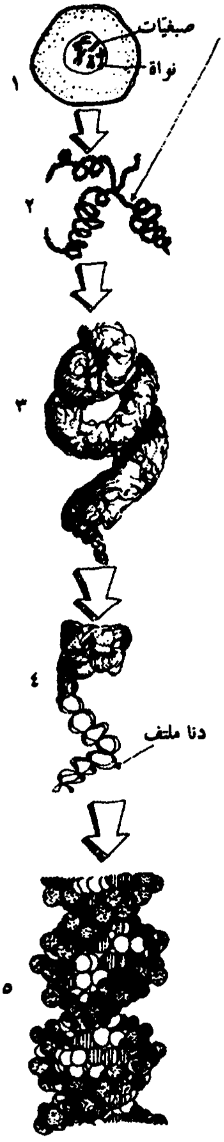
الأمينيّة، فإن الشكل العام للجزيء الضخم وزواياه وطيّاته والتفاتاته لا تعتمد إلا على الترتيب الذي تتعاقب فيه الحموض الأمينيّة. فيما يلي مثال ببعدين. لنتصوّر أننا نريد تركيب خط قطار كهربائي للأطفال بواسطة سكك مستقيمة طويلة، وسكك مستقيمة قصيرة،

وسكك منحنية، وتقاطعات. سيكون من السهل دائماً إعادة تركيب نفس الخط شرط أن يكون لدينا مخطط يبيّن ببساطة **ترتيب تعاقب السكك المختلفة**: أربع سكك مستقيمة طويلة، وتقاطع، وثماني سكك طويلة مستقيمة، وسكة واحدة منحنية لليسار، وسكة مستقيمة قصيرة، وثلاث سكك منحنية لليمين، . . . الخ. يكفي أن تكون هنالك سكّة واحدة منحنية في غير مكانها لكي يتغيّر كل شيء، فلا يصل ما تبقّى من الخط إلى مكان التقاطع. وبشكل مماثل، فإذا حدث خطأ في تركيب الهيموغلوبين، كأن يستبدل عنصر بناء واحد بآخر، لا يلبث الأشخاص الذين يرثون هذا الهيموغلوبين المشوّه أن يموتوا نتيجة لنوع خاص من فقر الدم الخلقي. هكذا يترجم هذا "الخطأ" النتيجة المأساويّة للطفور الجيني.

ولكن أين يوجد مخطّط تركيب آلاف البروتينات التي تُصنع باستمرار في الخليّة ؟ كيف يمكن لبويضة بشريّة ملقّحة صغيرة جداً (تظهر في البداية في شكل **خليّة واحدة**) أن تنمو وتتطوّر ومن ثمّ تتحوّل إلى إنسان مكتمل يملك مليارات الخلايا المتخصّصة، وقلب يمكنه أن ينبض، وعقل يستطيع التفكير . . . إلى درجة المقدرة على التكاثر بدوره؟ لقد بقي هذا اللغز لمدة طويلة واحداً من أعمق الألغاز في الطبيعة. وقد تساءل أرسطو في السابق عمّا يمكن أن يكون "المبدأ الفعّال"، هذا القادر على إعلام بويضة سمكة بسيطة لكي يحوّلها إلى سمكة حقيقية.

نحن نعلم اليوم (خاصّة بفضل أعمال ج. د. واطسون J. D. Watson وف. هـ. س كريك F. H. C. Crick وم. هـ. ف ويلكنز M. H. F. Wilkins الحائزين على جائزة نوبل في الطبّ والفيزيولوجيا سنة ١٩٦٢) أن الكمّية الهائلة من التعليمات اللازمة لصُنع كائن حيّ كامل - جرثومة أو عشبة أو فراشة أو إنسان - تكون **مدونة على المستوى الجزيئي**، في الخيط الطويل للجزيء الضخم الخاص بالحمض النووي الذي تمكنّا من معرفة دوره العظيم، بقدر ما هي موجودة داخل

الفيروسات أو البكتيريا أو الكائنات أحاديّة الخلية. هذه الركيزة الكونية، والتي بفضلها تنقل كلّ الكائنات الحيّة وبدون استثناء من جيل إلى آخر المميّزات الخاصّة بالنوع، تسمّى حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك (الدنا).



افتح أيّها الدنا!

إن حَمْضُ الديوكسي ريبونوكلييك (الدنا) هو جزيء طويل جداً ملتفّ داخل نواة الخلايا في شكل صبغيّات أو مُكوّر بحرّية في الخليّة البكتيريّة التي ليس لها نواة.

وإن توصلنا لبسط كامل حمض الديوكسي ريبونوكلييك الموجود في خليّة بشرية، فإن طول الخيط (لا يمكن رؤيته بالعين المجردة) سيبلغ ١,٥ متر. أما إذا وصلنا حمض الديوكسي ريبونوكلييك الموجود في جميع خلايا جسمنا، طرفاً بطرف، فسوف يتشكل خيط واحد يوازي طوله طول المسافة الفاصلة بين الأرض والقمر. وإذا اعتمدنا تكبيراً بواقع مليون، يصبح معه طول الشخص ١٧٠٠ كم، فإن طول خيط حمض الديوكسي ريبونوكلييك الموجود في خليّة واحدة سيصبح ١٥٠٠ كلم، في حين لا يتجاوز سمكه ٣ مليمترات فقط! يلتف هذا الحمض عدّة مرّات حول نفسه ويعطي بنية معقّدة من الأسلاك "المضفورة" المربوطة بالبروتينات والتي يمكن رؤيتها بالمجهر العاديّ بشكل عصيّات: إنّها

الصبغيّات *chromosomes*. وهناك ٢٣ زوجاً منها في كل خليّة بشرية. ورغم أن البنية التحتيّة للصبغي لم تُوضَّح بعد، إلا أننا سنسعى إلى ذلك بربط المستوى المجهري بالمستوى الجزيئي.

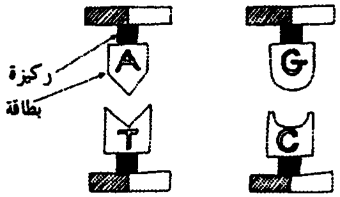
داخل نواة هذه الخلايا البشريّة، يمكننا أن نتبيّن الصبغيّات الحاملة للخاصّيات الجينية.

هذه النواة المُكبَّرة والمُبسَّطة جداً هي نواة خليّة توشك أن تنقسم (١). يمكن رؤية الصبغيّات بسهولة بالمجهر العادي. وهي تملك شكلاً مُميّزاً، ويمكن عدّها. يكون الصبغي المُكبَّر كثيراً (٢) من ألياف من الحمض النوويّ وأحد البروتينات (بروتين نووي). تتراص الألياف إلى جانب بعضها البعض. هكذا، يلتفّ "السلك" الجزيئي المتشكل حول نفسه مثل النابض (٣). وتكون اللوالب متراصة جداً وتعطي للمجموعة شكلاً مدمجاً.

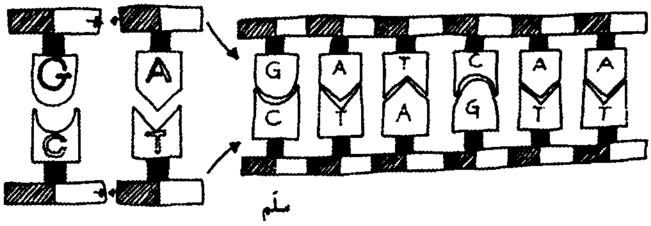
تسمح إعادة التشكيل هذه (التي لا تزال فرضية) بمقياس أكبر برؤية أحد هذه الألياف. ونحن نعتبر أن كل ليف يحتوي على خيط واحد من حمض الديوكسي ريبونوكلييك. هذا هو خيط حمض الديوكسي ريبونوكلييك (٤). وهو يتكوّن من طاقين من الجزيئات الملتفّة الواحدة حول الآخرى في لولب مزدوج. هذا الخيط إذا جرى تكبيره عشرات الملايين من المرّات يتيح لنا رؤية الذرّات التي تكونه. ففي بنيته الكيميائية يتم ترميز جميع التعليمات اللازمة لتوالد الخلية وعملها (٥).

تشبه سلسلة حمض الديوكسي ريبونوكلييك سلّماً مُكوّناً من حبل مجدول حول نفسه باتجاه الطول. يتكوّن هذا السلم من ارتباط أربعة "بطاقات"، ذكوراً أو إناثاً، مختلفة الأشكال:

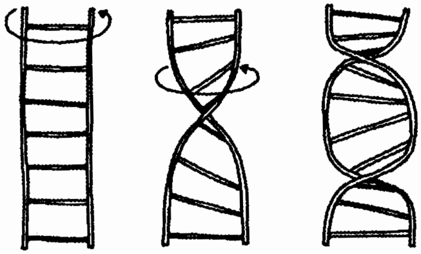
- بطاقة "ذكر" تُسمّى A (أدينين)
- بطاقة "أنثى" تُسمّى T (تيمين)
- بطاقة "ذكر" تُسمّى G (غوانين)
- بطاقة "أنثى" تُسمّى C (سيتوزين)



تمثّل هذه "البطاقات" أربع مواد كيميائيّة متطابقة ومعزولة. وهي مُعلّقة على جزء من قائمة السلّم يساعد في ربطها ببعضها البعض باتّجاه الطول. إنه جهاز التعليق المعياري المتمثل بالنسبة للبطاقات الأربع. وفي الحقيقة، فإن هذا الجهاز يتكون من جزيء من السكّر (الديوكسي ريبوز) الذي يعمل كركيزة للبطاقة، ومن جزيء من الحمض الفوسفوري الذي يحقّق الروابط بين كلّ ركيزة (راجع التفاصيل في الملحق رقم ٢).



يمكن أن ترتبط البطاقات A وT وG وC الواحدة بالأخرى وتشكّل قائمة للسلّم. ويبدو لنا هنا وجود قاعدة لرمز كيميائي (على سبيل المثال تكون المتوالية ATTGCACGCGAT مختلفة عن المتوالية TCGAAGCTTCGA) في مثل هذا التسلسل. ترتبط هذه البطاقات اثنين اثنين (فتوجِدُ زوجاً "ذكراً" - "أنثى") لتكوين قضبان السلّم، الذي يلتفّ في النهاية حول نفسه ليشكل "اللولب المزدوج" الشهير (كما هو مُبيَّن في الرسم على الصفحة التالية).



وبفضل بنيته الخاصة، فإن لجزيء حمض الديوكسي ريبونوكلييك خاصّيتين رئيسيتين:

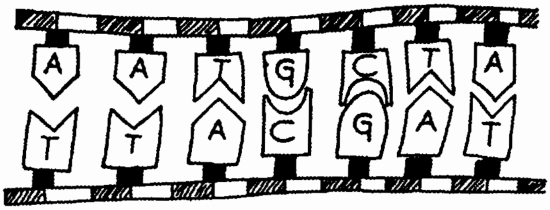
- يستطيع هذا الحمض أن يتضاعف باتّجاه الطول فيعطيَ سلسلتين متتامتين. وهذه هي الطريقة التي يُنسخ بموجبها مخطّط صنع كل كائن حيّ ويُنقل من جيل إلى آخر؛

- يحتوي هذا الجزيء على التعليمات التي تحدّد الترتيب الدقيق لتعاقب الحموض الأمينيّة داخل البروتينات، وتعيّن أيضاً أجهزة التنظيم التي تتحكّم في تخليق البروتينات (عدد أقل من البروتينات، أو عدد أكبر من البروتينات، أو سرعة أقلّ، أو سرعة أكبر. . .)

يُعتبر جزيء حمض الديوكسي ريبونوكلييك الركيزة الكيميائية للجينات. والجين هو متوالية لجزيء هذا الحمض تحتوي على التعليمات اللازمة لصنع بروتين محدّد. إنّه برنامج حقيقي مصغّر جداً ومكوّن من تعاقب "الحروف" التي تمثلها البطاقات الأربع A وT وG وC. يُسمّى كل "حرف" قاعدة وتسمى كل "بطاقة" مع ركيزتها نويدة *nucléotide*.

ها هو الأصل.

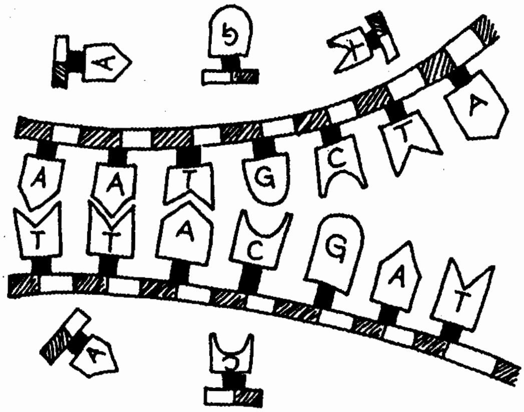
تتمثّل الخاصّية الأساسيّة الأولى لحمض الديوكسي ريبونوكلييك بإنشاء نسخ مماثلة عن طريق انقسامه إلى اثنين بواسطة الأنزيمات.

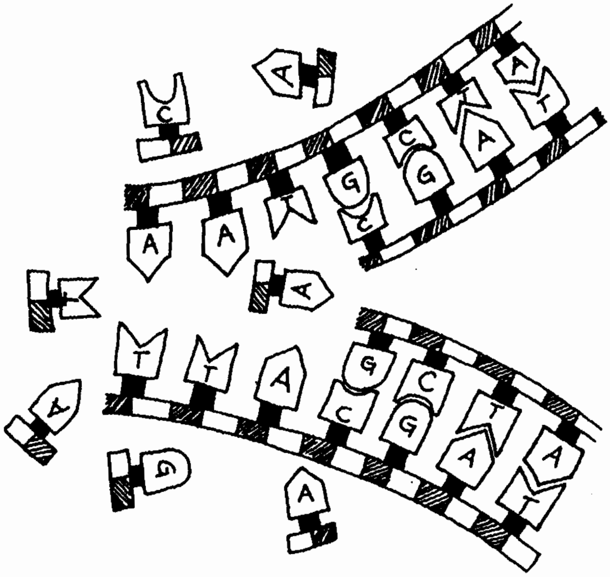


تبتعد قائمتا السلم الواحدة عن الأخرى مثلما تبتعد جهتا السحّاب الزمام.

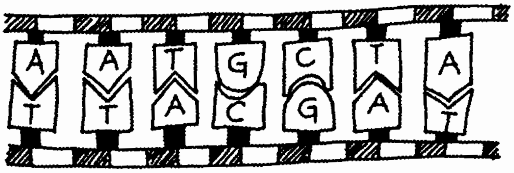
بما أنه توجد بكثرة في البيئة قطع من القواعد ATCG وبما أنّ كل قائمة تحافظ على تعاقب الحروف، فإن القوائم الجديدة المتكونة بواسطة الأنزيمات تحافظ أيضاً على الترتيب الدقيق لتعاقب حروف الرمز.

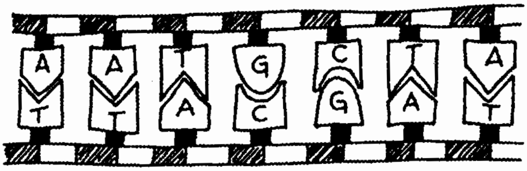
ها هما النسختان التامّتان. يحدث الانفتاح والتركيب بسرعة ١٠ إلى ٢٠ نويدة في الثانية.





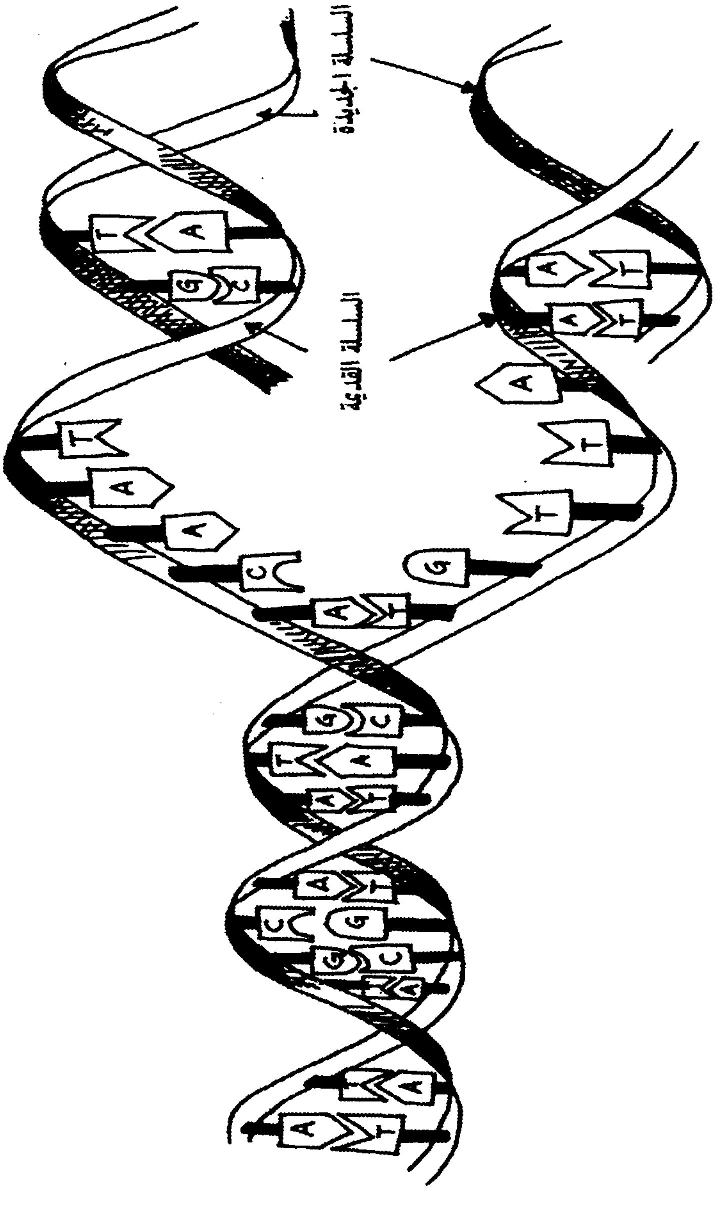
والواقع أن الأنزيمات تبسط في الحقيقة اللولب المزدوج وتعيد تكوين سلسلتين جديدتين.





الآليات الخلوية قيد العمل:

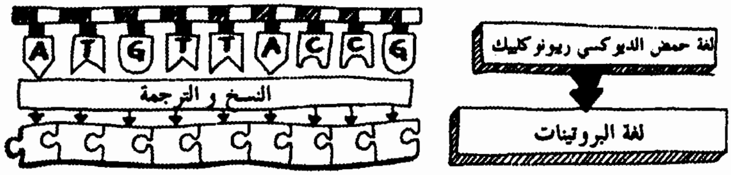
كيف يتم تسجيل الرمز الجيني *code génétique* ثمّ يُنقَل إلى مستوى الجزيئات؟ لفهم ذلك لا بد من حلّ الرمز السرّي للحياة،


السلسلة الجديدة
السلسلة القديمة

وهو مفتاح ترجمة لغة حمض الديوكسي ريبونوكلييك إلى لغة البروتينات.

ما هي شبكة حلّ الرموز الأكثر توافقاً مع هذه الترجمة؟ وما هي آلة الترجمة التي ستكون قادرة على القيام بهذا العمل؟ أيّ قاموس نستعمل؟

بالتأكيد يوفر لنا تعاقب القواعد الأربع على طول اللولب المزدوج لحمض الديوكسي ريبونوكلييك إمكانية تحقيق هذا الرمز. لكننا لسنا قادرين، بأربعة حروف لا غير (A T C G)، إلا على تحديد مواضع أربعة حموض أمينيّة في سلسلة من البروتينات. وبما أن هنالك عشرين حمضاً أمينياً، فما العمل؟ إذا جمعنا حروف الرمز الجيني اثنين اثنين لحصلنا على ١٦ توفيقاً لعملية الترميز (٤×٤)، ولكن إن جمعناها ثلاثة ثلاثة، فسنحصل على ٦٤ توفيقاً (٤×٤×٤)، وهو عدد كاف جدّا لجميع الحموض الأمينيّة و"علامات وقف" الرسالة الجينيّة. هذه المجموعات الثلاثية الحروف في الرمز تُسمّى "ثلاثيّات" أو "رواميز". وتحدّد كل رامزة codon موضع الحمض الأميني في المتوالية التي تكوّن البروتين.



لقد توصل الباحثون إلى حل شيفرة كامل الرمز الجيني. وكانت المفاجأة أن هذا الرمز هو نفسه لكل ما هو حي، سواء أكان جرثومة أو إنساناً. فيما يلي الجدول الكامل.

نلاحظ أنّ الحمض الأميني المسمّى، الهستيدين مثلاً (مختصره HIS) يكون "مرمّزاً" بالرامزة CAT و CAC. ويكون الميثيونين (MET) مرمّزاً بالرامزة ATG. ولبعض الحموض الأمينيّة عدة

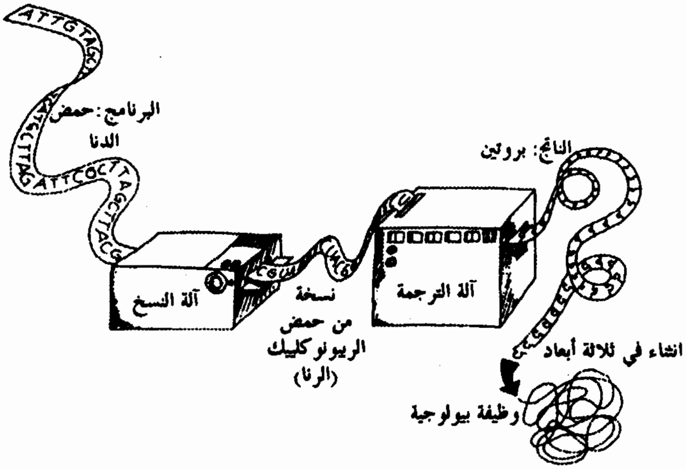
الموضع الأول	الموضع الثاني				الموضع الثالث
	T	C	A	G	
T	PHE	SER	TYR	CYS	T
	PHE	SER	TYR	CYS	C
	LEU	SER	STOP	STOP	A
	LEU	SER	STOP	TRP	G
C	LEU	PRO	HIS	ARG	T
	LEU	PRO	HIS	ARG	C
	LEU	PRO	GLU	ARG	A
	LEU	PRO	GLU	ARG	G
A	ILE	THR	ASP	SER	T
	ILE	THR	ASP	SER	C
	ILE	THR	LYS	ARG	A
	MET	THR	LYS	ARG	G
G	VAL	ALA	ASP	GLY	T
	VAL	ALA	ASP	GLY	C
	VAL	ALA	GLU	GLY	A
	VAL	ALA	GLU	GLY	G

روامز. لذلك نقول إن الرمز" مُطوّل" أو زائد عن الحاجة. وهذا ما من شأنه توفير مزيد من السلامة داخل آليّات تطوّر الأنواع.

يسمح هذا الرمز الكوني، إذن، بنسخ وترجمة لغة حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك إلى لغة البروتينات. ولكن لتحقيق هذه العمليّات الدقيقة يجب أن نستعين "بآلة جزيئيّة" تشبه الآلة المُبيَّنة أدناه:

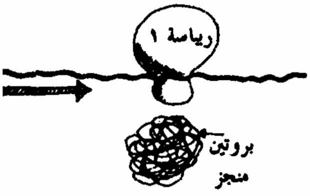
تستعمل الخليّة آليّات مشابهة تستند إلى ثلاثة عناصر أساسيّة: آلة لنسخ حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك، وآلة أخرى لترجمة الرسالة إلى بروتين، وجهاز موائم ـ مفسّر للروامز.

إن آلة النسخ هي عبارة عن أنزيم: الرنا البوليمراز. أما النُسخ فهي شكل آخر للحمض النوويّ يسمى حَمْض الريبونوكلييك (الريبي



النووي) والذي يختلف عن حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك في ثلاثة أمور رئيسيّة: فهو يتكوّن من قائمة واحدة للسلّم (طاق واحد)، والركيزة فيه (السكر) هي الريبوز (عوضاً عن الديوكسي ريبوز)، وأخيراً يستبدل الحرف T (ثيمين) فيه بالحرف U (يوراسيل)، ولكنّه يتّحد دائماً مع الحرف A.

تسمّى آلة الترجمة ريباسة *ribosome*. وهي تتكوّن في الوقت نفسه من سلاسل من حَمْض الريبونوكلييك ومن بروتينات. تكون الريباسة أكبر بخمس مرّات من البروتين وتزن مائة مرّة أكثر منه. وهناك تقريباً ١٠٠٠٠ ريباسة في البكتيريا وأكثر من ٥٠٠٠٠ على الأرجح في الخليّة الحيوانية.



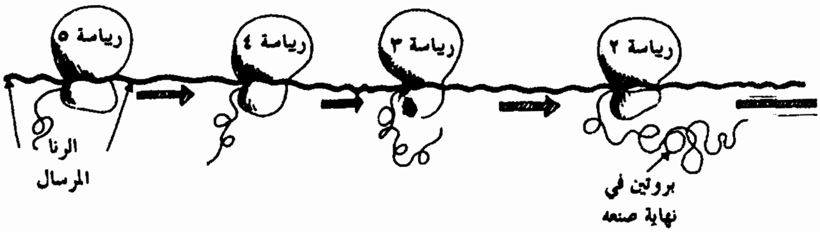
تعمل "آلات الترجمة - أي الريباسات" بشكل تسلسلي، فتقرأ

الرسائل التي يحملها الرنا المرسال واحدة بعد الأخرى وتصنع بروتيناتها، حمضاً أمينياً بعد آخر.

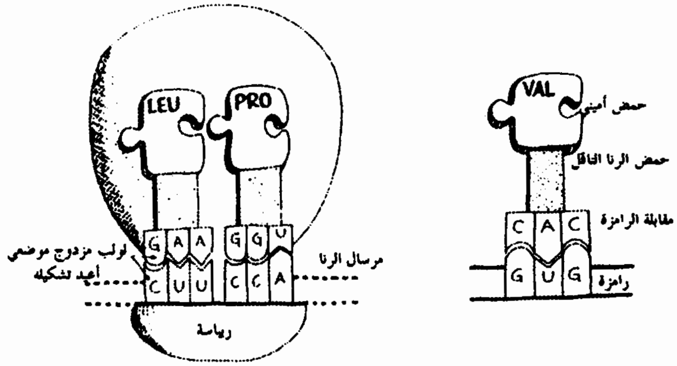
ويعتبر الجهاز الموائم - المفسّر للروامز قلب آلة الترجمة. وهو يسمّى **حَمْض الريبونوكلييك الناقل** ويضمن وضع كل حمض أميني في مكانه الصحيح في البروتين النامي. ولذلك، فهو يتدخّل، كالقاموس، بين لغتين، لغة حَمْض الريبونوكلييك ولغة البروتين. يملك أحد طرفيه "مفسّرا للروامز" على اتصال مباشر بالرنا المرسال (ويسمى **مقابلة الرامزة** *anticodon*) و"موائماً" مشدوداً إلى الحمض الأمينيّ الخاص الذي يرتبط به بطريقة خاصّة ويُحدَّد بواسطة رامزة حَمْض الريبونوكلييك.

تحتوي الخليّة على مقدار من طوائف حَمْض الريبونوكلييك الخاصّ بالنقل يوازي مقدار الرواميز الموجودة في كل حمض أميني. ولكي تتعلّق هذه الروامز ببعضها البعض، يجب أن "تُنشَّط" وتوضع على مسافة مناسبة فيما بينها. يتحقّق هذا التنظيم بهامش "جزيء واحد تقريباً" بفضل التعرّف إلى الرامزة ومقابلة الرامزة. وهكذا لن يكون بإمكان أيّ حمض أمينيّ أن يأخذ مكان حمض آخر.

تؤمّن الريباسة العمل الآليّ للمجموعة. فهي تموضع مرسال الرنا المرسل، وتترك المكان لحمضي رنا ناقلين، وتلعب دور القالب matrice لعملية البناء التدريجي للبروتين، وتقدّم الكلّ بحركة من "الرافعة ذات الشبيكة"، مثلما يتقدم الفيلم أمام رأس القراءة الخاص



به، وتسهّل جلب الطاقة من أجل عمل جميع هذه الآليّات.

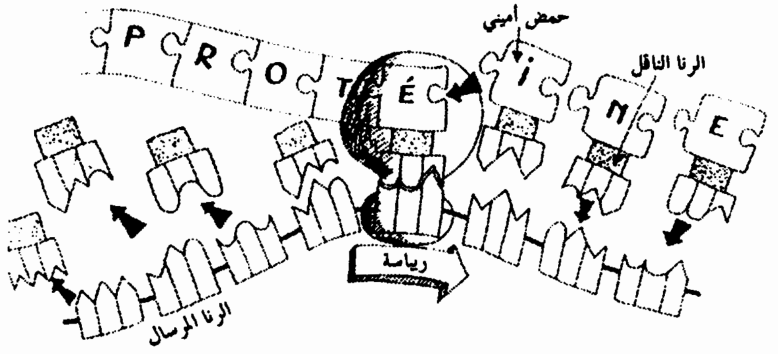


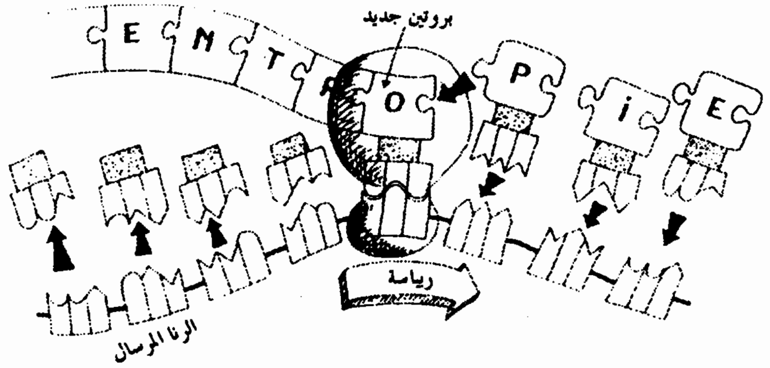
فيما يلي الرسم التامّ لتخليق بروتين على الريباسة. يستقرّ كل واحد من حموض الرنا الناقلة مؤقّتاً على الريباسة، ثمّ يترك مكانه للحمض الذي يليه. في ذلك الوقت، تعبر الريباسة خيط الرنا المرسال "قارئة" الرسالة التي يحملها هذا الأخير. يكفي أن نغيّر نظام الروامز على الرنا المرسال لنصنع بروتيناً آخر سيكون "جناساً تصفيحياً" للأوّل (**الانتروبيا عوضاً عن البروتين**).

لكي نفهم هذه الآليّة الأساسية بشكل أفضل، يمكننا أيضاً أن نتخيلها في شكل عمل إجمالي "لمصنع" خيالي يختص في صنع البروتينات.

تُشَبَّه **نواة الخليّة** بمكتب المدير. داخل هذا المكتب، تُرتَّب مخطّطات تركيب مختلف أنواع البروتينات التي تكوّن إنتاج المصنع (الخليّة). يتأمّن تجميع البروتينات بواسطة آلات نصف أوتوماتية مبرمجة: **الريباسات**. إليكم تسلسل العمليّات.

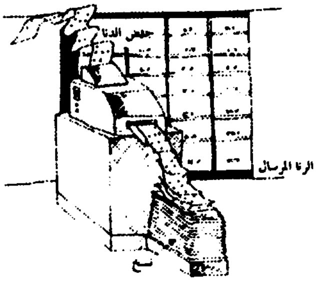
بطلب من المصنع، يتمّ البحث في الأدراج عن المخطّطات الموافقة لنوع خاصّ من البروتين (جينات البِنية). توجد هذه المخطّطات في شكل شرائط مُثقّبة (حمض الديوكسي ريبونوكلييك). من جهة أخرى، لا تبرح المخططات الأصلية أبداً مكتب المدير.





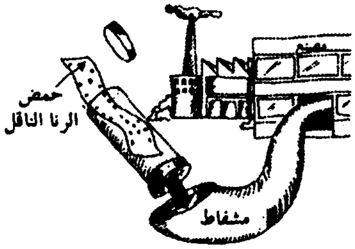
ذلك لأنّها إن أُتلفت في خضمّ الاستعمالات المختلفة، فسيكون من غير الممكن تعويضها. وسيُنقل التشوّه إذن إلى البروتينات التي ينتجها المصنع إلى ما لا نهاية. ولذلك، تُسحب مباشرة نسخ من هذه المخطّطات في شكل سهل الاستعمال **(الرنا المرسال)**. من ثمّ، تُرسَل النسخ إلى المصنع عبر المشفاط.

تفيد التعليمات المختلفة، التي تحملها الشرائط المُثقَّبة، في برمجة الآلات-الريباسات حيث تتجمّع البروتينات. تُدمج عشرون قطعة مختلفة في تركيب البروتينات (الحموض الأمينيّة العشرين). تُرتَّب هذه القطع في مخزن المصنع. يكون كل أمين في هذا المخزن

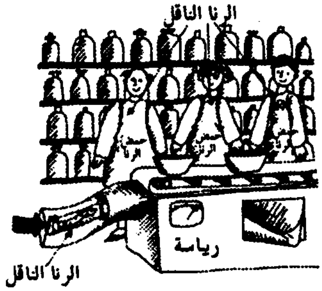


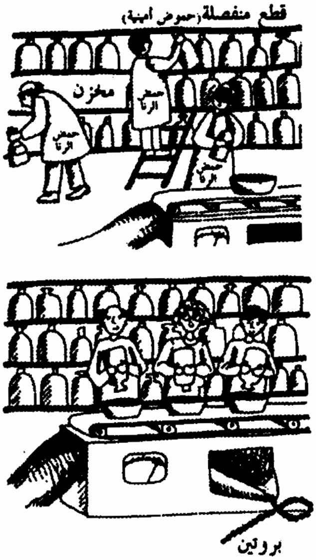
مسؤولاً عن قطعة معيّنة. ويجب على هذا الأخير أن يبحث عنها في المخزن ويحملها إلى مكان الريباسات. يُسمّى أمناء المخزن حموض الرنا **الناقل**. تُزَوِّد الآلة بالقطع المنفصلة. وتتطابق مختلف أنواع البروتينات الناتجة عن تجمّع هذه القطع مع البرنامج الموجود بداخل الآلة .

لقد أثبت تقدّم البحوث خلال السنوات الأخيرة وجود بدائل ضروريّة لآليّات النسخ والترجمة هذه. ولدى الفيروسات أو في الخلايا العليا على وجه الخصوص، يمكن أن " تُقرَأ" المعلومة البيولوجيّة بطريقة مغايرة.



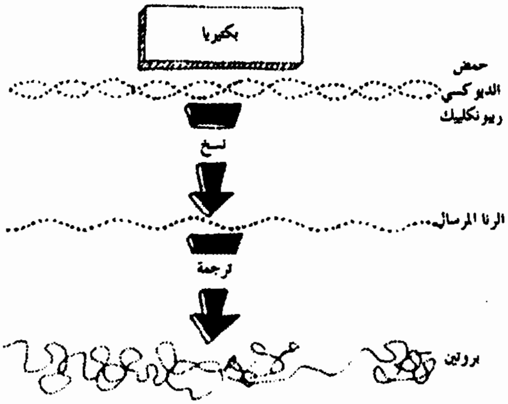
لقد "وَجدت" بعض الفيروسات الصغيرة، مثل فيروس التهاب الكبد البائي، وسيلة اقتصادية بشكل خاص لترميز المزيد من المعلومات داخل مادتها الجينية: فالمعلومة التي يحملها حَمْضُ الديوكسي ريبونوكلييك (الدنا) لا تُقرأ أبداً رامزة بعد رامزة لإنتاج الرنا



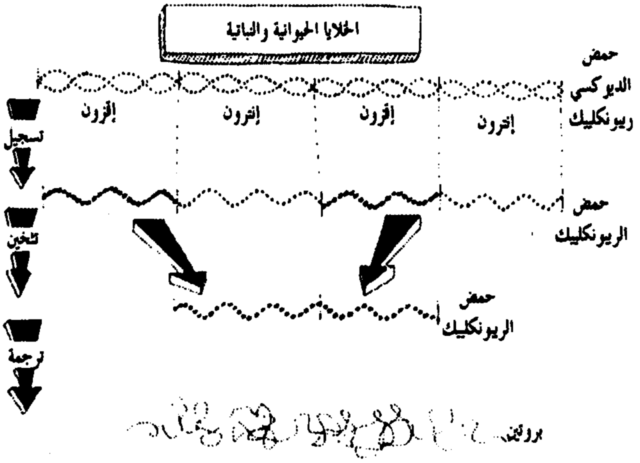


المرسال، وإنما حرفاً بعد حرف. الأمر الذي يسمح بترميز ثلاثة أضعاف المعلومات الموجودة في حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك وبالتالي صنع ٣ بروتينات بدلاً من بروتين واحد فقط في الظروف العاديّة. والآليّة بسيطة: تبدأ آلة النسخ (الرنا البوليمراز) بإعداد نُسَخها في أماكن مختلفة من حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك. ينتج عن ذلك العديد من حموض الرنا المرسال المختلفة مع، في البداية، نفس الرمز الجيني الذي يحمله حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك!

لقد اكتشف البيولوجيّون لدى الخلايا العليا تنظيماً خاصاً للجينات يعتبر أحد أكبر اكتشافات البيولوجيا الجزيئية وعلم الوراثة في السنوات الأخيرة. إنها الجينات "الفسيفسائيّة".



أما داخل الكائنات الدنيا، كالبكتيريا، فإن الجينات تكون متجاورة. يعطي الجين نسخة من الرنا المرسال بنفس الطول. في المقابل، تكون المتواليات الرامزة للبروتينات في خلايا الكائنات العليا (المسمّاة خلايا حقيقيّة النواة)، منفصلة بواسطة مناطق غير مترَجَمة. وللتمييز بين مختلف هذه المناطق، يطلق على المتواليات الرامزة للبروتينات اسم " إقزونات" *exons* ويُطلَق على المناطق غير المترجَمة اسم "إنترونات" *introns*.



يكتسب هذا الانفصال للجينات أهميّة بالغة لأنّه يسمح بإعادة تركيب القطع المختلفة مع بعضها البعض، وهو ما يزيد في تنوّع المواد التي تصنعها الجينات. وتجدر الإشارة إلى أن سيسيمو تونيغاوا S.Tonegawa، الحائز على جائزة نوبل في البيولوجيا سنة ١٩٨٧، استطاع مرتكزاً على هذه الخاصية للجينات الفسيفسائية أن يكشف كيف تتمكّن الخلايا المسؤولة عن الدفاع المناعي لجسمنا (اللمفاويّات البائية) من صنع مئات الملايين من الأضداد المختلفة، وذلك انطلاقا

فقط من ٤٠٠ قطعة من حمض الدنا القادرة على أن تتحد فيما بينها.

التنظيم الذاتي: إدارة الخلايا

الحياة تتماسك وتنتشر، ولكن كيف يمكن لها أن تتحكّم في ذاتها؟ بحسب ما رأيناه يبدو أنّ هذا التحكّم يُمارَس بواسطة أنزيمات متخصصة. ولكن أي قسم من الخليّة "يتقرّر" أن يصنع مثل هذا الأنزيم ويوقف تخليق الآخر؟ لقد تمّ تقديم أجوبة عن مثل هذه الأسئلة عبر أعمال جرت حول تنظيم الخلايا من قبل ثلاثة أساتذة في الطبّ والفيزيولوجيا حازوا على جائزة نوبل سنة ١٩٦٥ وهم أ. لوف A. Lwoff، وج. مونو J. Monod، وف. جاكوب F. Jacob من معهد باستور.

كيف يمكن للكائنات أن تتحكّم في نفسها، أو عموماً كيف يمكن لآلة أن تقود نفسها؟ هذا هو موضوع أحد العلوم الحديثة؛ ألا وهو علم التّوجيه Cybernétique.

قواعد "الحكم" الخلويّ:

في يوم من أيام خريف ١٧٨٧، وفي ألبيون ميلز وهو مصنع قيد الإنشاء في شمال إنكلترا، توصّل روّاد الآلة البخارية جايمس واط James Watt وماثيو بولتون M. Boulton إلى وضع نموذج لآلة مستمرّة هدفها الإطاحة بآلة نيوكومن Newcomen البخارية. في الأثناء، طُرح مشكل جوهري: كيف يمكن تنظيم سرعة هذه الآلة التي تجمح كالحصان المجنون؟ وكيف يمكن كبحها حسب رغبة الإنسان؟ سيكون من العبث أن نخصّص لكل آلة - كما جرت العادة - شاباً قليل المهارة: يثبت نظره على مقود جامد ويده متشنّجة على حنفيّة البخار كما لو أنه بِدلة من لحم فوق فولاذ الآلة. قام كلّ من واط وبولتون بتطبيق اختراع توماس ميد T. Mead على الآلة البخارية كما سبق وجرى تطبيقه على طاحونة الريح. تتباعد الكرات المعدنية التي تدفعها البكرة الموصولة بمحور المحرك كلما دار المحرك بسرعة

كبيرة. ينتقل تباعد الكرات إلى قضيب يسد سِكْر إمداد البخار. تخف سرعة المحرّك فيما تسقط الكرات ثانية، ما ينتج عنه تجدّد إمداد البخار وتسارع الآلة من جديد. بذلك يُحتفظ بالسرعة ثابتةً على مرّ الزمن. هكذا إذن اكتُشِف المُنظِّم ذي القوّة النابذة المعروف باسم "مُنظِّم الكرات" والذي سمّاه واط وبولتون حاكم *governor*.

تُستمدّ كلمة حاكم جذرها من كلمة "حكومة" (*Kubernetes* باللاتينية) وهي تعني قائد الدفة أو النوتيّ. ومن هذه الكلمة اشتقت كلمة سيبرنطيقا التي تعني "علم التوجيه" الذي يعني بحسب أمبير Ampere، سنة ١٨١١، "فنّ حكم الإنسان". وأُعيد اكتشاف كلمة علم التوجيه على يد نوربارت وينر N. Wiener سنة ١٩٤٥ في مؤلفه الشهير **علم التوجيه** *Cybernetics*. فيما بعد، أعطى الفرنسي كوفينيال Cuffignal لهذا الاكتشاف دلالة جديدة ألا وهي "فنّ ضمان فعاليّة الحركة". إنّها المرّة الأولى التي تحظى فيها آلات معقدة من صنع الإنسان بخاصّية التنظيم الذاتي، تلك الخاصية التي تتميّز بها الكائنات الحية. إذ أصبحت الآلات قادرة على أن تكيّف سرعتها حسب هدف محدد سلفاً. من جهة أخرى، تستطيع كمية بسيطة من المعلومات المدرجة ثانيةً في الآلة أن تتحكم في إطلاق كميات كبيرة من الطاقة. فالثورة الصناعيّة لا تعود فقط إلى اليوم الذي عرف فيه الإنسان كيف يطلق الطاقة الأحفوريّة للفحم ليحوّلها إلى بخار، وإنما أيضاً إلى اليوم الذي تعلّم فيه تنظيم عمل الآلات بواسطة المعلومة الموزّعة بذكاء. فالثورة الصناعيّة الأولى وُجدت إذن من تزاوج الطاقة مع المعلومات.

ونحن نخلط كثيراً بين علم التوجيه وتكنولوجيا الحواسيب الإلكترونيّة أو تكنولوجيا "الروبوط". لكن مجال هذا الميدان هو في الحقيقة أكثر شموليّة بكثير. ذلك أن علم التوجيه يهم في الواقع البيولوجيا وعلم الاجتماع والاقتصاد وكذلك الفلسفة. ويمكننا، بالاستعانة بالأمثلة، إبراز القوانين العامة لعلم التوجيه من أجل تطبيقها على خاصّية التنظيم الذاتي على المستوى الجزيئي للكائنات الحيّة.

ما هي الاختلافات الأساسيّة بين آلة أوتوماتية ذات جهاز قيادة صارم وبين آليّة مؤازرة؟(*)

تقدّم الأجهزة المؤتمتة المشهورة لڤوكانسون Vaucanson في القرن الثامن عشر مثالاً جيداً عن الآلة الأوتوماتية وذات جهاز القيادة الصارم. فقد كانت هذه الآليّات البارعة (لاعب ناي، بطّ قادر على أن يهضم، . . .الخ) تُسيَّر بواسطة آلية ساعة تتحكم في مجموعة من الكامات *cames* التي تعمل على تحريك الأطراف.

ومن الأمثلة الأخرى على الأجهزة الأوتوماتية ذات جهاز القيادة الصارم جهاز إشارات المرور عند مفرق الطرق الذي تحرّكه خزانة ذات ملامسات، أو آلة نقل تصنيع محرّكات السيّارات في سلسلة التركيب.

تتبع الآلات الأوتوماتية تطوّراً محَضّراً سلفاً. ويجب أن تكون برامجها (شجرة ذات كامات، بطاقات مثقّبة، أقراص، شرائط مغنطيسية، لفافة علبة الموسيقى، إلخ) دقيقة جداً وتستلزم بالتالي المزيد من المعطيات الأولية، لأن المهمة التي تنجزها الآلة معقّدة جداً. تتكرر دورة العمليات التي تقوم بها الآلة بشكل مماثل في كل مرة. ويمكننا القول إذن إن حرية الجهاز منعدمة: فهو لا يستطيع أن يتكيّف مع تغيّرات محيطه(**). ما هي خصائص الآليّات المؤازرة؟

مثال على ذلك الكبسولة الفضائية. فهذه الكبسولة مجهّزة بجهاز توجيه يسمح لها بتحقيق لقاء مداري في الفضاء. وفضلاً عن سرعتها التي تضعها في المدار، فإن الكبسولة تتحرك بواسطة دفعات نفثيّة صغيرة تساعدها في تحديد توجّهها. تُحلِّل المسافة التي تفصل هذه الكبسولة عن هدفها بواسطة رادار، وتُحوّل البيانات إلى حاسوب موجود فيها يقارن الفارق الموجود في لحظة محدّدة بين المسافة

(*) تستطيع الآليّة المؤازرة أن تغيّر سلوكها ذاتيا تبعاً للمعلومات التي تتلقّاها من محيطها.

(**) فحتّى وإن كان مفرق الطرق مزدحماً فإن الإشارات الضوئيّة تستمرّ بالتناوب بين الأحمر والأخضر.

الحقيقيّة والمسافة المرجوّة ويطلق اشتعال صواريخ التوجيه. آنذاك، تتوجه الكبسولة "بمفردها" نحو الهدف المقرر لها.

إذن، تعمل الآليّة المؤازرة بواسطة تجارب وأخطاء متعاقبة وبمحاولات متردّدة. هكذا استطاع العديد من الآليّات المؤازرة المماثلة أن تتخذ مسالك مختلفة لتصل رغم كل شيء إلى نفس الهدف. لذلك، يمكن أن يتغيّر تطورها تبعاً للظروف الخارجية التي تتكيف معها. و ليس من الضروري إذن تزويدها ببرنامج مفصّل، بل يكفي تحديد الهدف من غير غموض. هكذا، تحظى هذه الأجهزة بنوع من التسيير الذاتي في إنجازها لعملها. ويكون تأثير تحرّكها "الذكي" الذي تتركه فينا راجعاً لأحد خصائصها الأساسيّة: التغذية الراجعة *rétroaction* (أو: *feedback*)، وهي طريقة تقنية بارعة تعتمد على إعادة ضخ الآلة بحصيلة تجاربها السابقة.

تنجز الآلات بعض العمليات التي تتعاقب ضمن ترتيب منطقي، السبب يسبق النتائج ولا يعقبها أبداً. هكذا ففي الجهاز الأوتوماتي يكون إدخال البرنامج (١) وتشغيل المحرّك (السبب) (٢) سابقاً لتنفيذ بعض المهام (النتائج) (٣).

تتابع المتواليات ١ - ٢ - ٣ في ترتيب زمني. وسوف يبدو لنا من المستحيل أن تسبق المرحلة ٣ المرحلة ١ أو ٢ .

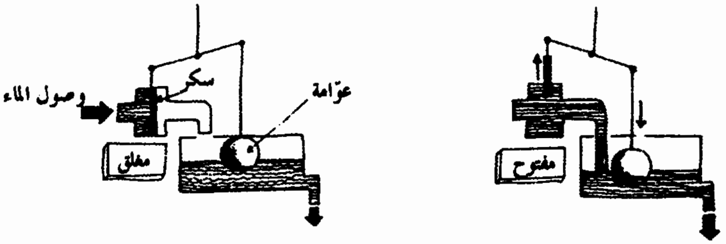
لقد قلب علم التوجيه عاداتنا في التفكير عندما عكس الترتيب الزمنيّ للظواهر وعمل على دراسة الأنظمة التي تكون فيها **النتائج مرتبطة بالأسباب**. هذا الربط يُسمّى **التغذية الراجعة**. يمكن أن نوضّح هذه التغذية الراجعة بواسطة جهاز منظّم ذاتياً وبسيط جداً: حوض يُحتفظ بمستواه ثابتاً بواسطة عوّامة متصلة بحنفيّة إمداد الماء.

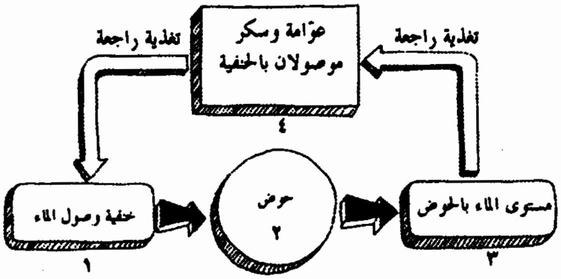
فيما يلي التتابع الزمني للأحداث:

تفتح حنفيّة وصول الماء (١). يمتلأ الحوض (٢). يرتفع مستوى الماء في الحوض (٣). ترتفع العوّامة فتغلق السِكْر الذي

يمنع بدوره وصول الماء (٤). بواسطة العوّامة والذراع المفصلي، تتفاعل النتيجة (مستوى الحوض) مع سببها (دفق الحنفية) لتغيّره(*).

ولكي نفهم الدارة العامّة للتغذية الراجعة، انطلقنا من الجهاز في حالة التوقف. لكننا ندرك بسهولة أنه حالما يتم تشغيله، يستطيع هذا الجهاز أن يعمل بلا انقطاع شريطة أن تتوفر له الطاقة اللازمة (وصول الماء في هذا المثال). والواقع أنه بسبب استعماله باتجاه المجرى، يمكن لمستوى الماء في الحوض أن ينخفض، فتنزل العوّامة من جديد وتجر معها السِكر الذي يَفتح حنفيّة الماء، ثم يرتفع مستوى الماء ثانيةً في الحوض،.. الخ.





يحافظ جهاز التنظيم الذاتي هذا على كمّية ثابتة(**). وهو يُدرج عنصر استقرار في الجهاز، فمن دون عوّامة يُخشى أن يفيض

(*) المقصود هنا هو تغذية راجعة سلبيةً حيث تتفاعل النتيجة مع سببها لتوهنه: كان بإمكاننا تناول عدد كبير من الأمثلة الأخرى -بدءا بمنظم الحرارة إلى منظّم الكرات في الآلات البخاريّة - لأنّ الرسم الأساسي مماثل.

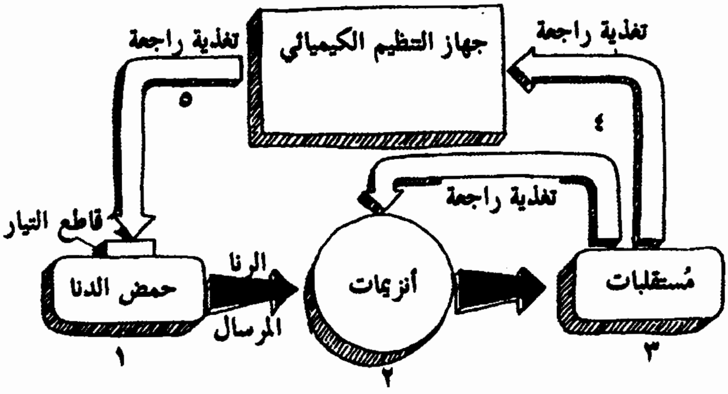
(**) مستوى الحوض أو حرارة الغرفة في حالة الجهاز المزود بمنظّم حراري.

الحوض. فهناك آليّة ذاتية التنظيم تهتز بلا نهاية حول وضعية توازن مستقر وتصحح نفسها بضربات صغيرة لإعادة ضبط هذه الوضعية. والمقارنة مع الكائنات الحية صارخة في هذا المجال.

ومع ذلك، يمكن أن تكون حلقة التغذية الراجعة مؤلّفة من أجهزة أقل فظاظة من العوّامة وسِكر الحوض في المثال السابق. والواقع أن ما يدور في كامل الحلقة هو **معلومة**، أي إشارة قابلة لأن تطبق **فعلاً**. ويمكن توصيل هذه المعلومة بسلك كهربائي مثلما يمكن توصيلها بواسطة موجة كهرمغنطيسية أو صوت أو أنبوب أو بواسطة جزيئات تتحرّك في الخليّة مثل الإشارات. هذا هو قاعدة علم توجيه الجزيئي.

شبكات الاتصال في الجزيئات:

يتم الاستقلاب - تلك "الصناعة المجهريّة في الخليّة" - بواسطة الأنزيمات. تصنع هذه الأنزيمات، بالعمل "المُسَلسَل"، المواد الكيميائية التي تحتاجها الخليّة دوماً والتي نسمّيها **مُستقلَبات** *métabolites*. وعندما يصل تركيز الجزيئات داخل الخليّة إلى مستوى أمثل، يجب على سلاسل التركيب أن تتمكن من التوقف. وبمعنى آخر، يجب على الإنتاج أن يتوقف حالما يتجاوز العرض الطلب، وأن يستمر في الحالة العكسية.



يماثل رسم هذا العمل الخلويّ **المُنظِّم ذاتياً** رسم الحوض لأنّ القوانين التي تحكم هذه الأجهزة ذات التغذية الراجعة هي نفسها.

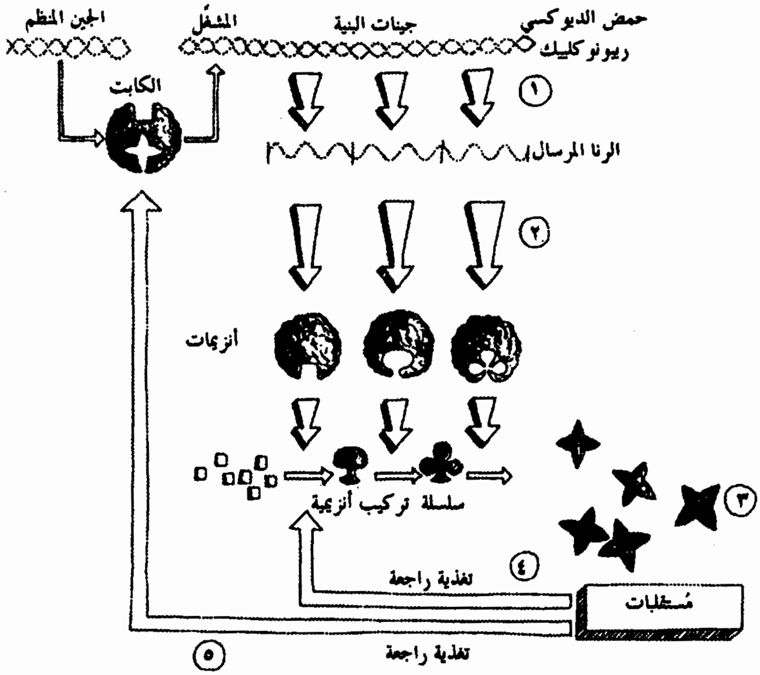
تَنقل جينات بنية حمض الديوكسي ريبونوكلييك (١)، بواسطة الرنا المرسال، التعليمات الضروريّة لصنع الأنزيمات. تُنتِج الأنزيمات، بعملها المُسلسَل (٢)، الجزيئات الضروريّة لحياة الخلايا: المستقلَبات. يرتفع تركيز هذه المستقلَبات في الخليّة (٣). كما يمكن لها إما أن توقف مباشرة سلسلة التركيب التي تصنعها (٤)، وإما أن تؤثر في جهاز التنظيم الكيميائي الذي "يُغلق" قاطع تيار حمض الديوكسي ريبونوكلييك ويراقب جينات البنية، وبالتالي يوقف تخليق الأنزيمات (٥). توقف منتجات المصنع الكيميائي الخلوي **صنعها الذاتي**.

يعتبر هذا الرسم تبسيطاً لرسم الأستاذين مونو وجاكوب المتعلّق بالتنظيم الخلوي. يسمى قاطع تيّار حمض الديوكسي ريبونوكلييك **مشغِّلاً** *opérateur* لأنه يراقب الجينات البنيوية. يكون هذا المشغِّل في تبعيّة **للكابت** *represseur*، ذلك الجزيء الضخم الذي يُخلَق بموجب أوامر **الجين المنظِّم**. إنّه ذلك الكابت نفسه الذي "يكشف" في الخلية وجود أو غياب جزيئات المستقلَبات ويوقف، أو يطلق، على المشغِّل.

وفي الحقيقة، فإن عمل هذا النظام لا يتوقف أبداً (سوى عند الموت). فما أن يقلّ تركيز نوع معين من المستقلَبات حتى يقوم جهاز التنظيم الكيميائي بفتح "القاطع" ثانية مفسحاً المجال أمامه في التحكّم، على حمض الديوكسي ريبونوكلييك، في "سيل" المعلومات اللازمة لصناعة هذا الأنزيم أو ذاك. هكذا، لا تُصنَع إلاّ الأنزيمات القادرة على تجميع النوعية الخاصة من الجزيئات المتغيّبة.

هكذا إذن توظّف الخليّة باستمرار إنتاجها بحسب متطلّباتها. والخلية هي إذن، مثل أي كائن حي أو أي تجمع من الكائنات

الحيّة، منظومة معقّدة متكوّنة من دارات ذات تغذية راجعة مشبوكة الواحدة على الأخرى: الكلّ يتفاعل رجعياً مع الكل. بذلك يمكن للخليّة أن تقود نفسها بنفسها.



في سنة ١٩٣٢، أعطى العالم البيولوجي الأمريكي والتر كانّون W. Cannon اسماً لهذه الخاصيّة العامة كونها خاصّية تميز الأجهزة المعقدة: "الاستتباب" *homéostasie*. يمكّن الاستتباب من الاحتفاظ بثبات قيمة واحدة أو مجموعة من القيم الضروريّة لحياة الكائن (مثل معدّل الكلسيوم أو الغلوكوز في الدم). منذ ١٨٦٥، كان كلود برنارد C. Bernard قد استنتج أنّ «استقرار الوسط الداخليّ هو الشرط الأساسيّ لحياة حرّة».

الخليّة الحيّة والكائن الحيّ هما نظامان معقّدان مزودان بالتسيير الذاتي في استعمال الطاقة والمعلومة لا سيّما بفضل خاصّية الاستتباب. فالاستتباب هو من يجعل تكامل العناصر التي تكوّن الكائن الحي ممكناً: شبكة اتصال كثيفة جداً تضمن تماسك البنى والمهام. تتواصل الجزيئات فيما بينها داخل الخليّة. إنها حاملة المعلومات. هذه المعلومة ما هي في أغلب الأحيان إلاّ شكلها. وهذا الشكل تعرفه المستقبلات (البروتينات مثلاً)، التي تحمل "في شكل تجويف" بصمة هذا الجزيء ـ الإشارة، ما يؤدي إلى إطلاق آلية عمله. وهي آليّة مماثلة للآلية التي يتعرف بواسطتها القفل إلى المفتاح. والحال أن هناك عدداً لانهائياً من الأشكال الممكنة للمفتاح وكذلك للأقفال التي توافقها...

تتواصل الجزيئات فيما بينها أيضاً بفضل هذه الجزيئات ـ الإشارات. فهي تضمن مثلاً، في نسيج حيّ (مثل نسيج الجلد)، "تنظيم الولادات". والخلايا لا تتكاثر إلا لتسدّ الجروح ثانية. هذا هو التندّب. وسنرى لاحقاً أنّ الخلية السرطانية تبقى صمّاء تجاه إشارات التنظيم التي ترسلها إليها الخلايا الأخرى في الجسد.

أما على مستوى الكائن الحي بأكمله، فإن شبكات الاتّصال الجزيئي والخلوي وداخل الخلايا تندمج معاً متيحة للكائن الحيّ أن ينفتح على بيئته ويتطور. وما التطور المنسجم للجنين انطلاقاً من بويضة ملقّحة، ونقل المعلومات ما بين أعضاء الجسد بواسطة الجهاز العصبي أو بالهرمونات، ودفاع الجسم ضد الجراثيم بواسطة الكريات البيض والأضداد، سوى مهام ضرورية للحياة تقوم على التواصل الجزيئي والخلوي. ولدى الإنسان، يكوّن كل من الجهاز العصبي والجهاز الهرموني والجهاز المناعي ثلاث شبكات اتصال متماسكة "تستعلم" بالتناوب. ويمكن لعدم توازنها الناتج عن تغيّرات فجائية في البيئة أو عن صدمة نفسية أن يكون مصدر أمراض خطيرة.

تربط شبكات الاتّصال هذه مهام المحافظة الذاتيّة والتكاثر الذاتي والتنظيم الذاتي فيما بينها، وتلعب بالتالي دوراً هاماً في التكامل الذي من دونه لن تكون الحياة ممكنة.

يمكننا في نهاية هذا الجزء الأوّل ـ ما هي الحياة؟ ـ أن نحاول رسم "مخطّط تقريبي" لأولى الكائنات الحيّة التي ينبغي أن نتتبع تاريخها في الوقت الحاضر. فيما يلي إذن سماتها الأساسية:

ـ شكل عامّ لقطرة سيتوبلازم صغيرة بحجم بضعة ميكرونات، يحيط بها غشاء وتتألف بمجملها من البروتينات والحموض النوويّة.

ـ تركيبة كيميائية عنصريّة ذات قاعدة من الكربون والهيدروجين والأكسجين والنتروجين (٩٠٪ من المادة الحيّة).

ـ وظائف أساسية للمحافظة الذاتية والتكاثر الذاتي والتنظيم الذاتي مرتبطة بشبكة اتصال.

ولكن هذا الجزء الأول يقودنا أيضاً إلى طرح الأسئلة التالية، وهي أسئلة أساسية في البيولوجيا حالياً:

كيف تتكوّن بنية الخليّة المميّزة للكائنات الحية؟

كيف يُنشّط "التيار الكهربائي الصغير" الذي يشغّل آليّات الحياة؟

كيف تمكّنت جينات حمض الديوكسي ريبونوكلييك من اكتساب المعلومة التي تحويها؟

كيف تَنسّق "المنظِّم" الذي يسمح للخلية بالمحافظة على "مستوى حياتها"؟

القسم الثاني

من أين تأتي الحياة؟

ـ ١ ـ
المقاربات الجديدة لأصل الحياة

أوپارين وتيلارد: الروّاد

بعد أعمال پاستور وداروين، صار يصعب أكثر فأكثر تصور نشوء الكائنات الحية خارج التطوّر الارتقائي للمادة.

خلال العشرينات والثلاثينات من القرن العشرين، شجّعت السنوات العلمية العديدة، الناشئة عن العلوم الأكثر تنوعاً، على ظهور فرضيات مثمرة وفتحت سبلاً جديدة في مجال البحث. ولأول مرة، صار بإمكاننا أن نأخذ جدياً بتعميم مبدأ التطور على المادة الجامدة، وأن نجمّع في حصيلة شاسعة ما يكفي من العناصر القادرة في الوقت نفسه على أن توحّد تصورنا للكون وأن تمد جسراً ما بين العالم الفيزيائي والعالم البيولوجي.... أي بالإجمال، ما يشكل حصيلة تضع مسألة أصل الحياة ضمن سياق إرتقائي.

تحقّقت هذه الحصيلة على يد عالم البيوكيمياء السوفياتي أوپارين A. I. Oparine الذي نشر لأول مرة أفكاره سنة ١٩٢٤، وعلى يد عالم الأحافير الفرنسي تيلارد دو شاردان P. Teilhard de Chardin الذي لم تُجمّع أعماله ولم تنشر إلاّ مع بداية سنة ١٩٥٥(*).

(*) حدس تيلارد دو شاردان مُحَصّل فرضيّاته منذ ١٩١٦ (الحياة الكونية) وصاغها خلال السنوات الفاصلة بين ١٩٣٨ و١٩٥٠.

هكذا، سيسمح هذان الكاتبان بتصوّر مسألة أصل الحياة في شكلها النظري وفي شكلها التجريبي على حد سواء.

في نظر تيلارد دو شاردان، فإن مادّة الكون منظّمة في سلسلة من التعقيد المتنامي. تبدأ هذه السلسلة بالجسيمات الأولية، تتبعها الذرّات، فالجزيئات، ثم الخلايا، والكائنات الفرديّة، ثمّ تمتدّ أخيراً نحو التجمّعات المعقّدة التي تكوّنها المجتمعات البشريّة. يقدّم كلّ مستوى من التعقيد مواد البناء التي انطلاقاً منها يتكوّن المستوى التالي، مستوى التعقّد الأعلى.

كان تيلارد دو شاردان على ما يبدو من أوائل الذين أكّدوا أن هذا التصنيف المُجسِّد وفق نظام من التعقيد المتنامي يتناسب أيضاً مع التصنيف الزمني. من هذا المنظور، ولكي نفهم الحياة في مرحلتها الأوليّة، لا بد من رصدها "من خلال ما يسبقها عوضاً عمّا يليها".

«**مأخوذة في تنازلها**، تغرق الخليّة كمّاً وكيفاً في عالم البنى الكيميائية. ممدّدة مباشرة خلف نفسها، تتلاقى بكل وضوح مع الجزيء [...] ويبدو أن الجزيئات الضخمة تحمل بداخلها أثر تاريخ طويل. كيف يمكن أن نتخيل فعلاً أنها تمكنت، مثل الجسيمات الأبسط، أن تنبني فجأة وأن تبقى كما هي نهائياً؟ إن تعقيدها وعدم استقرارها يوحيان على الأرجح، قليلاً كما في الحياة، بتطوّر إضافي طويل يليه نمو متواصل على مدى سلسلة من الأجيال. [...] هكذا تعمقت، من خلفنا، هوة الماضي إلى حد يدفعنا ضعف ذهني لا يقهر إلى الضغط في مرحلة دائماً أكثر ضعفاً من حيث المدّة ـ فيما تجبرنا العلوم بتحاليلها على أن نمدّها دائماً أكثر»(*).

كيف نتصوّر التعقيد؟ تكون المنظومة أكثر تعقيداً كلما كانت تمتلك عدداً أكبر من العناصر الوثيقة الارتباط ببعضها البعض. بهذا المعنى، يكون الدماغ البشري المكوّن من عدة مليارات من الخلايا

(*) P.Téilhard de Chardin, *le phénomène humain*, Le Seuil, p. 81 - 87.

المترابطة (العصبونات) أكثر تعقيداً من البكتيريا، تلك الخلية المعزولة البسيطة، ويكون جزيء البروتين الضخم - مثل الهيموغلوبين - أكثر تعقيداً من أحد الحموض الأمينية التي تكوّنه.

لا شك في أن عدد وتنوّع **الروابط** التي تُدمِج الأجزاء المتنوّعة المكوّنة للكل هي أكثر أهمية أيضاً من عدد العناصر المكوّنة وحده. ويمكن القول إنّ الكل، في الأنظمة المعقّدة، هو **أكثر** من مجموع أجزائه(*).

فالتعقيد البيولوجي هو في الوقت نفسه تنظيم في الأبعاد الثلاثة للفضاء، وتنظيم في **الزمن**. يمثّل هذا الزمن المتراكم منذ الأصل كامل مدّة التطور.

كيف يمكن تصوّر مثل هذه المدة؟ لنلجأ للحيلة ونحوّل الزمن إلى فضاء. لنأخذ كبّة من الخيوط ونربط أحد طرفيها إلى وتد (يمثل الحاضر)، ولنبسط شيئاً فشيئاً هذه الكبّة ونغوص في الماضي (أي نبتعد عن الوتد). سنتّفق على أننا في كل مرة نبسط فيها **سنتيمتراً** من الخيط، نكون قد اجتزنا تقريباً **ألف عام نحو الماضي**. هكذا ندرك حجم الفراغ المهول الذي يمتد منذ تكوّن الأرض إلى حد ظهور الخلايا الحية الأولى. فما الذي حدث؟

فيما يلي بعض المعالم: على بُعد سنتيمترين (٢٠٠٠ سنة)، نجد ما يوافق ولادة المسيح. ويجب بسط الخيط ١٠ أمتار (مليون سنة) لكي نشهد ظهور الإنسان الأول. وللوصول إلى عصر أولى الخلايا الحيّة، يجب أن نجتاز ٣٠ كيلومتراً (٣مليارات من السنين) انطلاقاً من الوتد. وأخيراً بعد مسافة طويلة، سيكون بين أيدينا خيط يبلغ طوله ٥٠ كلم: إنها كامل المدة المنقضية منذ تكوّن كوكبنا. (نقدّر فعلاً أن الأرض قد تكوّنت منذ ٤,٥ إلى ٥ مليارات من السنين).

(*) وهو ما يمكن تأويله بحقيقة أنّه، حتّى بمعرفتنا لخصائص الأجزاء وقوانين تفاعلها، لا يمكننا التنبّؤ بالمجموعة المتكاملة.

ميلاد المسيح	٢٠٠٠ سنة	٢ سم
أنسان نياندرتال	١٠٠٠٠٠ سنة	١ م
الانسان الأول	مليون سنة	١٠ م
الزواحف العملاقة	١٠٠ مليون سنة	١ كلم
مدوزات ومرجان في المحيط	مليار سنة	١٠ كلم
الأشكال الأولى للحياة	٣ مليارات سنة	٣٠ كلم
تكوّن الأرض	٥ مليارات سنة	٥٠ كلم
نشوء الكون	١٠ مليارات سنة	١٠٠ كلم

لقد ساهمت فرضيات عالم الكيمياء السوفياتي أوپارين في تسليط الأضواء من جديد على هذه الفترة الشاسعة "لما قبل الحياة". ويمكن صياغة السؤال الذي خطر بباله بالطريقة التالية: كيف بدأت الحياة، بما أنّها لا يمكن أن تنشأ إلاّ عن كائن حيّ آخر؟ هكذا وجد أنصار الأصل التطوّري للحياة انطلاقاً من المادّة الجامدة أنفسهم

محتجَزين في سلسلة من "الحلقات المفرغة" التي تذكّر من بعض النواحي بذلك الجدل الشهير حول الدجاجة والبيضة: فنحن نعلم أن كل دجاجة تخرج من بيضة وأن كل بيضة تخرج من دجاجة. فمن منهما ظهر أولاً؟ إن كانت البيضة، فمن باضها؟ وإن كانت الدجاجة، فمن أين أتت؟ فيما يلي بعض الأمثلة عن الحلقات المفرغة:

ـ المركّبات العضوية الأساسية للحياة: **السكّر والدهون والبروتينات والحموض النوويّة** هي اليوم مصنوعة، على وجه الحصر، من قِبل الكائنات الحيّة. **فكيف تمكنت هذه المركّبات من الظهور في ظل غياب هذه الكائنات؟**

ـ الحيوانات (غيريّة التغذية) لا يمكنها أن تحيا بدون الأغذية التي تصنعها النباتات (ذاتية التغذية). ولكن مثل هذه الكائنات تستوجب في نفس الوقت منظومة لجلب الطاقة الشمسية ومنظومة مكمّلة لاستعمال تلك الطاقة. وكان من المفروض، منذ الأصل، أن تكون **معقّدة جداً** ومن ثم **غير محتملة**. فضلاً عن ذلك، فإن العنصر الأساسي للتخليق الضوئي هو الكلوروفيل الذي تصنعه على وجه الحصر الكائنات الحيّة.

ـ لتخليق الجزيئات المعقّدة ، أساس المادّة الحيّة، باستمرار لا بد من وجود **الطاقة**. ولكن المصدر الكوني للطاقة التي تستخدمها الحياة ـ ثُلاثِي فُسْفاتِ الأَدِينُوزين ـ هو نتاج للكائنات الحيّة، كما أن صنع هذه الطاقة داخل الخليّة يحتّم وجود آلية كيميائية معقّدة.

ـ تكون تفاعلات أساس الحياة، حتى لدى الكائنات الأبسط، محفّزة بالأنزيمات. ولكن الأنزيمات تستمد معلوماتها من الحموض النووية المجمّعة بدورها بفعل الأنزيمات! من كان هنا الأوّل؟

لقد وجدنا أنفسنا في طريق مسدود. ويعود للعالم أوپارين الفضل الكبير في اقتراحه وسيلة تفضّ أغلب هذه الحلقات المفرغة وتفتح السبيل أمام جميع التجارب الحاضرة. لقد نشر لأوّل مرة

سنة ١٩٢٤(*) فرضياته حول أصل الحياة، فسبق ببعض السنوات عالم البيولوجيا البريطاني ج. ب. س. هالدان J. B. Haldane. وقد نشرت أعمال هذا الأخير، المستقلّة عن أعمال أوپارين، سنة ١٩٢٩. وتجدر الإشارة إلى أن نقطة الانطلاق في النظريتين هي نفسها رغم اختلافهما في بعض التفاصيل.

بالنسبة إلى أوپارين، كانت الظروف التي تحكم فترة تكوّن الأرض مختلفة تماماً عن تلك التي نعرفها اليوم. وعلى وجه الخصوص، لم يكن الغلاف الجوّي البدائي لكوكبنا يحتوي لا على الأكسجين ولا على ثاني أكسيد الكربون ولا على النتروجين، ولكنّه كان، في المقابل، مزيجاً "غير مضياف" من **الهيدروجين والميثان والأمونيا وبخار الماء**. هذا المزيج المقذوف بالإشعاع الطاقي الشديد والذي تصدره الشمس سيمنح الحياة ، حسب أوپارين وهالدان، لكميّة كبيرة من **الجزيئات العضوية**.

تساعدنا هذه الفرضيّة إذن على الخروج من أوّل حلقة مفرغة: **مكوّنات عضوية تمكّنت ، نظرياً، من التكوّن في غياب الكائنات الحيّة**.

كان لا بد لهذه المكوّنات العضوية من أن تسقط في المحيطات وتتراكم في غضون فترات زمنية طويلة جداً مكوِّنة بالتالي "حساء مغذّياً" حقيقياً لعب دور الغذاء لأولى الكائنات الحيّة. وبدورها فضّت، نظريّا، الحلقات المفرغة الخاصة بأصل الكائنات ذاتيّة التغذية والطاقة البيولوجية: فمن المرجح أن أولى الكائنات الحية كانت **غيريّة التغذية**. وكانت هذه الأخيرة تحصل على طاقتها من الوقود الكيميائي الموجود في الوسط المحيط. هكذا، مع ظهور فرضيّة التغذية الذاتيّة

(*) صدر الكتاب الضخم لأوپارين بالإنكليزية سنة ١٩٣٨، ثمّ تُرجم سنة ١٩٥٧ إلى الفرنسيّة تحت عنوان **أصل الحياة على الأرض**. يجب أن نشير إلى أهمّية مساهمات الباحثين الفرنسيين في الصياغة الأولى لفرضيّات أوپارين مثل د. بيرثولو D. Berthelod وهـ. غوديشون H. Gaudechon (١٩١٠) وب. بيكريل P. Becquerel (١٩٢٤).

(كائنات معقّدة تظهر في بيئة بسيطة)، عارض كل من أوپارين وهالدان نظرية التغذية الغيرية: الظهور (الأكثر احتمالاً) **للكائنات البسيطة في بيئة معقّدة**. هذه الكائنات البسيطة جداً ولكن الكاملة، كانت عرضة، على مدى ملايين السنين "للانتقاء الطبيعي"، وهو تغيير منطقي على الصعيد اللاعضوي للإنتقاء الداروِيني. إذن، يكون الخيار الوحيد الممكن أمام هذه الكائنات الأوّلية هو أن: "تكون أو لا تكون".

على ضوء هذه الفرضيّات، يمكن أن نصف السياق المحتمل للظواهر التي أفضت إلى تكوّن الجزيئات العضوية الأولى. لذلك، يجب معاودة الصعود حتى بداية العالم.

في النجوم: لبنات الحياة

الكون، في نظر الكثيرين، هو **الفضاء**. فضاء لا محدود مرصّع بنقاط صغيرة متلألئة بمثل الشموس؛ فضاء يضيع فيه الفكر والنظر في الأعماق المظلمة والمقلقة.

لكن الكون ليس كذلك وحسب. الكون يمثّل الكل، أو المجموعة: الطاقة، الذرات، الجزيئات، النجوم، المجرّات، الأرض، الرياح، المد والجزر، الحياة، الفكر... في هذا الكون تتعايش وتمتزج أشكال تترتّب حسب سلم من التعقيد المتصاعد، يوازي تصوّرنا لدوام العالم. الكون إذن هو أيضاً الزمن، مجسّداً بالتكوينات الأكثر فأكثر تعقيداً للتطور.

وبغضّ النظر عن البِنى الموضعية للحياة، تشير نظرة أولية إلى الكون الذي يحيط بنا إلى أن تكوينه الكيميائي في غاية الرتابة: ٩٩ بالمائة من الهيدروجين والهليوم ـ العنصرين(*) الأبسط والأخف ـ و١ بالمائة فقط من المواد الأثقل.

(*) العناصر هي الأنواع الكيميائية للذرات: وهناك تسعون عنصراً طبيعياً، تبدأ بالهيدروجين الأخف وتنتهي باليورانيوم الأثقل.

هل كان الكون دائماً مشابهاً لذلك الذي نراه اليوم، أم إنه، بخلاف ذلك، قد تطوّر؟ تتيح لنا بعض المصادر الراديوية والضوئية القوية جداً والموجودة على بُعد يقدّر بالعديد من المليارات من السنوات الضوئية مشاهدة الكون إبان حداثته. مثل هذه المصادر تسمّى **الكازارات** *Quasars* (الكازار هو مصدر راديوي شبه نجمي). وفي نظر العديد من علماء الكون، تمثل هذه المصادر دليلاً على أن الكون كان في أصله أكثر كثافة مما هو في الوقت الحاضر. ربما هذه الكثافة تتناقص، فمعنى ذلك أن الكون في توسع: تتباعد المجرات الواحدة عن الأخرى، وذلك بسرعة نسبية متناسبة مع المسافة الموجودة بينها. نتج الكون إذن عن انفجار كتلة من مادة أصلية كثيفة جداً تشكل الكازارات فيها بقايا "أحفورية".

في نظر علماء كون آخرين، يُعتبر تطور الكون عملية دورية: فهو يمر بمراحل توسّع ومراحل تقلّص. وفي نظر البعض الآخر فإن الكون مستقر لا يتطور، وليس له أصل ولن تكون له نهاية. لا يمكننا طبعاً البتّ في مثل هذه الأسئلة التي تتطلب العديد من سنوات البحث، ولكن يبدو اليوم أن أقدم الأشياء في الكون هي أيضاً أكثرها بساطة. وبما أنه لا يمكن أن توجد الحياة بدون الجزيئات، والجزيئات بدون الذرات، والذرّات بدون الجسيمات الأولية، فكيف تكونت الذرات إذن، باعتبار أنها أساس كل ما هو موجود؟

حول السؤال عن أصل العناصر المكوّنة للكون هناك نظريتان تتعارضان. تنص النظرية الأولى على أن العناصر الطبيعية التسعين قد تشكلت مرّة واحدة في داخل الكرة الكثيفة جداً التي بعثت بانفجارها الحياة في الكون. أما النظرية الثانية فإنها تنص على أن الهيدروجين وحده (أبسط عنصر) هو الذي يكوّن المادّة الأصليّة، أمّا الذرّات الأخرى، الأثقل منه، فتتكوّن باستمرار في النجوم.

كان ينبغي لواحد من النجوم الأولية التي تكوّنت على أذرع إحدى المجرّات العديدة أن يؤدي إلى ولادة نظامنا الشمسي. ونحن

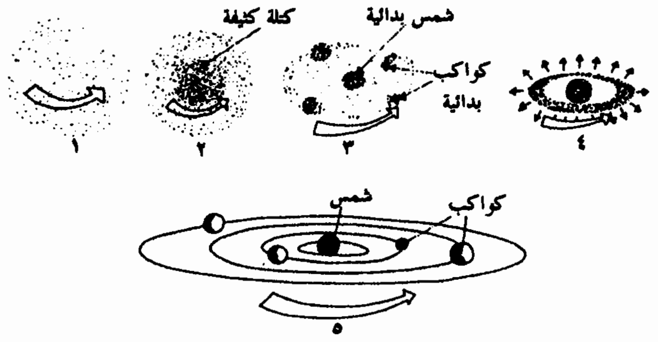
نعتقد أنّ الشمس وكواكبها قد نتجت عن إحدى السحب الشاسعة من الغاز والغبار الكوني، الناتجة بدورها عن التشظّي الداخلي للمجرّات. وهذه الكتلة الغازية كانت قد تكتّلت وتقلصت نتيجة لدورانها حول نفسها بوتيرة متسارعة ، باعثة الحياة في الشمس والكواكب. وكان يجب أن يكون سلوك الجزء الغازي من السحابة (الهيدروجين والهيليوم) مختلفاً عن سلوك الجزء الصلب (الغبار). وفي الواقع، فقد أفلت الهيدروجين والهيليوم في الفضاء بينما بقيت الجسيمات الصخريّة والمعدنيّة في مكانها. ويُخيّل إلينا أن الكواكب قد تكوّنت إثر تكتّل هذا الغبار، وعلى الأرجح بفضل معادن في حالتها السائلة أو اللّزجة تلعب دور الرابط. تنمو هذه البذرات شيئاً فشيئاً بامتصاصها للتكتلات الأصغر منها التي تعترض طريقها وتتحوّل بالتالي من حجم الحصاة إلى حجم الكواكب الحالية. ولن يبقى في الفضاء المحيط بالنجم سوى كتل ضخمة متباعدة جداً وبالتالي لا يمكنها أن تضايق بعضها البعض(*).

وبينما كانت كتلة الأرض تتزايد تدريجياً، كانت قوى الجاذبية تميل إلى رصّ الجسيمات الصخرية التي تكوّنها الواحدة مقابل الأخرى. نتج عن ذلك ارتفاع كبير في درجة الحرارة: فغاصت المواد الثقيلة المنصهرة نحو المركز لتشكيل النواة فيما هاجرت المركّبات الخفيفة نحو القشرة. أما البراكين فكانت تقذف على السطح صخوراً بحالة الانصهار ولا تلبث أن تتصلب بدورها. خلال هذه العملية، كان لا بد أن تتكوّن تشكيلة كبيرة جداً من المركّبات الكيميائية.

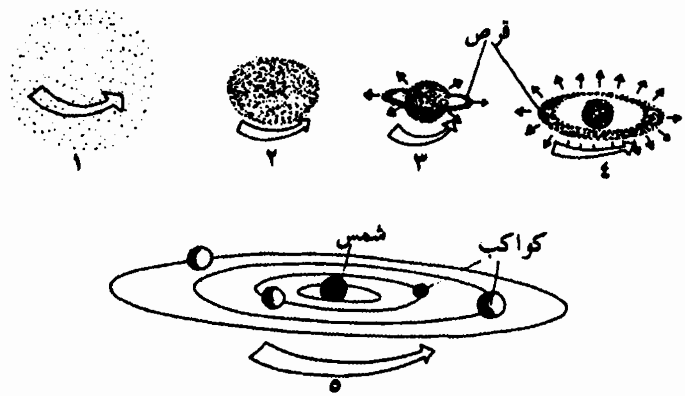
والسبب هو التالي: فقد تكوّنت المجرّات انطلاقاً من سحابة

(*) الكواكب الأكثر قرباً من الشمس (عطارد، الزهرة، الأرض، المريخ) هي صغيرة وصخريّة أساساً (حديد وسيليس (رمل الصّوان) ، بينما تكون الكواكب البعيدة (المشتري، زحل، أورانوس، نبتون) أكبر منها وتتكوّن معظمها من المواد الخفيفة (ثلج، هيدروجين، ميثان، أمونياك صلب.)

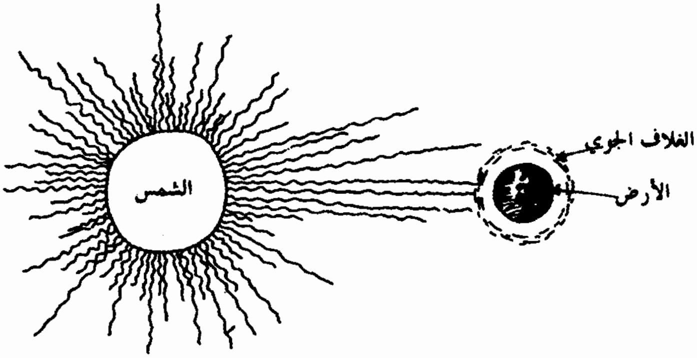
ذات تركيبة في غاية التجانس: ٩٩٪ من الهيدروجين والهيليوم. والحال أنّه بعد تكوّن النظام الشمسي (وبصورة عامة أي نظام كوكبي بلا شك) **يصبح الوضع منقلباً تقريباً**. وبالفعل، فبعد انتهاء سيرورة "الفرز الكوني" *écrémage cosmique* تصبح المواد **الأكثر ندرة في**



الكون (١٪) مجمّعة في نقاط ممركزة (الكواكب) حول نجم مركزي. وسيكون لمنظومة الشمس ـ الأرض في المستقبل تأثير كبير على سرعة تحوّل المادة إلى حالات قصوى من التعقيد.



فهذا النظام ليس فقط "مخزناً" حقيقياً مليئاً بالكواشف الكيميائيّة (الأرض) يقع على "مسافة مناسبة" من مصدر طاقة قوي (الشمس)، وإنما هو **نظام مفتوح**(*) يتلقى باستمرار طاقة "نَدِيّة" ستسمح بظهور و"بقاء" المركّبات الكيميائية المعقدة(**).



وبصورة عامة، ينبغي على الكيميائي الذي يريد تحقيق تفاعل ما أن يعمل بالطريقة التالية:

يجب أولاً أن يتحقق من أنه يملك **مصدراً من الطاقة** الكافية (سخّان غازي، صفيحة تسخين كهربائية، طبق سخّان... الخ). ويلزمه بعد ذلك **جهاز للتخليق الكيميائيّ** (مُفاعل). وهذا الجهاز هو عبارة عن كرة من الزجاج مخصّصة لتركيز الكواشف في المكان الذي يُستعمل فيه مصدر الطاقة وتجميع مواد التفاعل. يُدخل الكيميائي **الكواشف** في الجهاز ويسبّب التفاعل بإشعال التسخين أو بإطلاق أي مصدر طاقي آخر. يحصل **التفاعل** حسب قوانين التراكيب الكيميائية. تتمثل آخر عمليّة في **فصل** المواد الجديدة المتراكمة في الكرة. إن

(*) يتبادل النظام المفتوح باستمرار الطاقة أو المادّة مع محيطه. لهذا يجب أن لا نخضعه لقوانين الديناميكا الحراريّة الكلاسيكيّة، التي تنطبق على الأنظمة المنعزلة، بل لقوانين الديناميكا الحراريّة غير العكوسة.

(**) يبدو لنا هذا التطور فريدا لأنّ الأمر يتعلّق بشمسنا وأرضنا. وهو على الأرجح شائع في الكون.

منظومة الشمس ـ الأرض مشابهة لكرة الكيميائي. **فمصدر الطاقة هو** الشمس بالتأكيد. والتفاعلات الحرارية ـ النوويّة التي تحصل فيها تولّد إشعاعاً قوياً ينتشر في مجمل الفضاء المحيط: أشعة فوق بنفسجيّة وأشعة ضوئية وأشعة تحت الحمراء.

تمتلك الأرض، نظراً إلى حجمها وكتلتها، حقل جاذبية شديد يكفي لجذب وتركيز الجزيئات الغازيّة التي لولا ذلك لكانت مشتتة في الفضاء. ها هو إذن "المُفاعل" في مكانه: سطح صخري محدود، قادر على تركيز الكواشف الكيميائية على مقربة من مصدر للطاقة وعلى تلقّي مواد تفاعل مُحتَمل.

يعود بنا شرح الكيفية التي بها تمكّنت الكرة من أن "تمتلئ" إلى إعادة رسم تاريخ أول غلاف جوي للأرض. فالبحث عن أصل هذا الغلاف الجوي يجب أن يتم في نفس الوقت داخل الشمس الأولية وداخل الأرض البدائية ذاتها.

تكون الشمس، مثل أغلب النجوم، محاطة بغلاف جوي كوكبي تكون فيه درجة الحرارة مرتفعة جداً، إلا أنها، مع ذلك، أقل ارتفاعاً من درجة الحرارة السائدة داخل النجم.

في هذا الغلاف الجوّي يمكن **للهيدروجين والأكسجين والنتروجين والكربون**(*) أن تشكّل جزيئات بسيطة وشديدة الصلابة مؤلفة من **ذرتين اثنتين**. تنتج هذه الجزيئات، مثلاً، من ارتباط الكربون مع نفسه، أو من ارتباط الكربون مع الهيدروجين أو النتروجين أو الأكسجين.

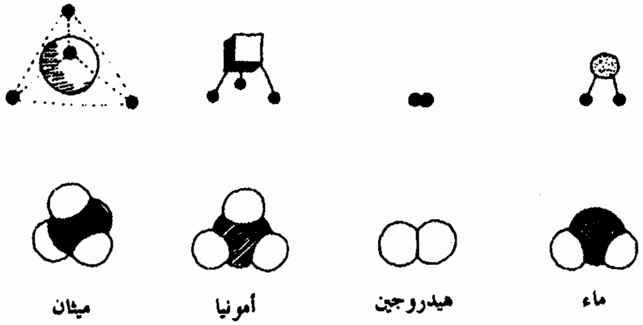
ما إن تبتعد هذه الجزيئات المبتورة عن النجمة بسبب التهيج الحراريّ أو بضغط من الأشعّة ـ هذا ما كان يجب حصوله خلال تكوّن النظام الكوكبي ـ حتى تتوق للاستقرار بإعطاء جزيئات أكثر تعقيداً ولكن

(*) تعتبر هذه العناصر، مع الهَلْيُوم، الأكثر انتشاراً في النجوم وعلى الأرجح في الكون. وتجب الإشارة إلى أنها تكوّن أيضا (خلافاً للهليوم) العناصر الأربع الأساسية للمادة الحيّة.

أقل تفاعلاً. ما هي هذه الجزيئات؟ لقد تمكّنا أخيراً من إثبات أنه في وسط غني جداً بالهيدروجين وعند درجة حرارة منخفضة نسبياً، لا يمكن للكربون (C) والنيتروجين (N) والأكسجين (O) البقاء في الحالة الحرّة وإنما في شكلها الهيدروجيني. والحال أن الكربون المتحد مع أربع ذرات من الهيدروجين هو عبارة عن جزيء **الميثان** (CH_4). والنيتروجين المتحد مع ثلاث ذرات من الهيدروجين هو الأمونيا (NH_3). وأخيراً الأكسجين المتحد مع ذرتين من الهيدروجين هو جزيء الماء (H_2O). تكون هذه الجزيئات شديدة الاستقرار. والجدير بالذكر أنه، في بداية سنة ١٩٦٩، تمّ اكتشاف سحب شاسعة من غاز الأمونيا والماء والفورمالدهيد (انظر ص ١٢٧) بواسطة المقراب الراديوي *radiotélescope* في بعض المناطق من المجرة.

نعتبر، من ناحية أخرى، أن هذه الغازات نفسها قد تمكّنت من الخروج من داخل الغلاف الصخري للأرض أثناء التسخين(*).

هذه الغازات هي، إلى حد ما، "أسلاف" المادة العضوية: فهي التي ستحدد لها تركيبتها الكيميائية. وهذه الجزيئات الخفيفة تطفو حول الكوكب بدون أن تتمكن من التشتت وتكون معرّضة **مباشرة للأشعة الشمسية**.



(*) يرافق هذه الغازات على الأرجح، الهيدروجين المكبرت (SH_2) وكمّيات صغيرة من ثاني أكسيد الكربون (CO_2).

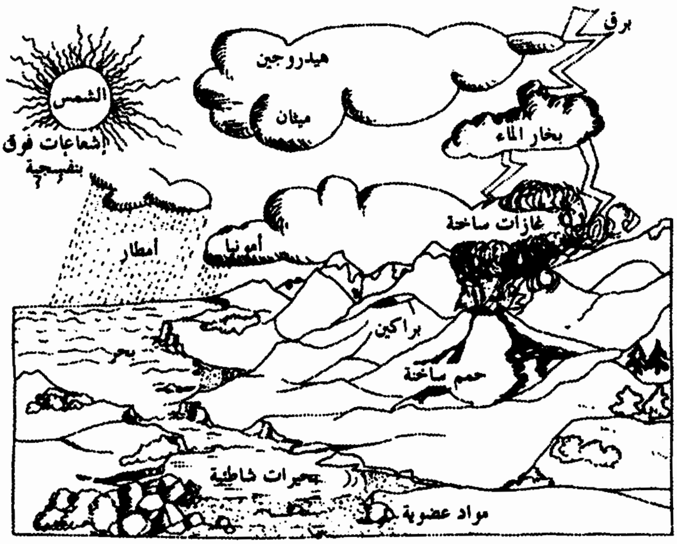
كيف كان مفعول الأشعة الشمسية على مثل هذه الكتلة الغازيّة؟ وكيف كانت آلية أول تخليق عضوي أرضي؟

نحن نعلم أن الروابط الإلكترونيّة التي تربط الذرات ببعضها البعض في الجزيء تحتوي على الطاقة، وهذه الطاقة تُطلق، مثلاً، عند تفاعل الاحتراق. ترتكز كل الكيمياء العضوية أساساً على إمكانية فتح أو غلق هذه الروابط ما بين الذرات، ما يسمح بتَعلّق قطع الجزيئات وصنع تشكيلة هائلة من الأجسام العضويّة. إلا أن فتح أو غلق الروابط الكيميائيّة هو مسألة طاقة بصورة أساسية. فالأشعّة الشمسيّة (فوتونات طاقِيّة) تصبح قادرة على قطع الروابط التي تربط ذرات الهيدروجين بكربون الميثان أو بنتروجين الأمونيا أو بأكسجين الماء. وقد سبق أن بدأت بعض الجزيئات العضوية البسيطة بالتشكّل **حتى قبل أن تتكتّل الأرض نهائياً**. وقد تأكّدت هذه الفرضيّة مؤخراً بواسطة فحص المذنّبات وتحليل الأحجار النيزكية والأرصاد التي أعطاها المقراب الراديوي.

هذه "القطع" من الجزيئات، المسمّاة **جذوراً حرة**، تكون شديدة التفاعل، فهي تتحد ببعضها البعض بسرعة فائقة مولِّدة جزيئات أكثر ثقلاً وتعقيداً. تسقط هذه الجزيئات الجديدة باتجاه سطح الأرض حيث تتراكم مواصلةً تفاعلها الواحدة مع الأخرى.

ومن المرجح أن الأشعّة الشمسيةَ لم تكن هي المصدر الوحيد للطاقة: فقد كانت البراكين تقذف في الجو، وعلى ارتفاع كبير، مواد وغازات محرقة جداً، وكان البرق يمزّق بدون انقطاع الغشاء الغازي للأرض متسبباً في لمح البصر في تخليق العديد من المركّبات العضوية. وفي تلك الأثناء، كان بخار الماء يتكثّف في المناطق العليا الأكثر برودة في الجو ومن ثم يهطل في شكل أمطار.

وإضافة إلى الطاقة الناجمة عن الأشعة فوق البنفسجية، كانت طاقة البرق والبراكين تسهم بقسط كبير في التخليق العضوي الأولي الذي كان يحصل في الغلاف الجوّي البدائيّ للأرض.



السنوات الأولى للأرض

وأياً كانت الأجسام الوسيطة المُكوِّنة، فلم يكن يتراكم على الأرض سوى المركّبات **القادرة على الصمود**.

وخلال ملايين السنين، "هبطت من السماء" مركّبات نسميها "عضوية" لأنها تمثّل في يومنا الحاضر جزءاً من الكائنات الحيّة. في هذه المرحلة، لم تكن سوى مواد أكثر تعقيداً بقليل من بقيّة التراكيب الكيميائية في الكون التي كانت أصلاً أقدم منها. ومنذ ذلك الحين بدأت تتثبت خاصيتان للحياة إلى الأبد: أسس تركيبتها الكيميائية، أي الكربون والهيدروجين والأكسجين والنتروجين، ومصدرها الدائم للطاقة، أي الشمس.

لماذا لا نسعى إذن اصطناعياً وفي المختبر إلى إعادة تكوين الظروف التي وصفها أوپارين وهالدان، والتي كان يجب أن تحكم

العصور الأولى للأرض؟ إنه أمر جدير بالمحاولة! هذا ما اكتشفه ستانلي ميلّر S. Miller الكيميائيّ الشاب البالغ الخامسة والعشرين من العمر.

تخليق الحياة داخل المختبر؟

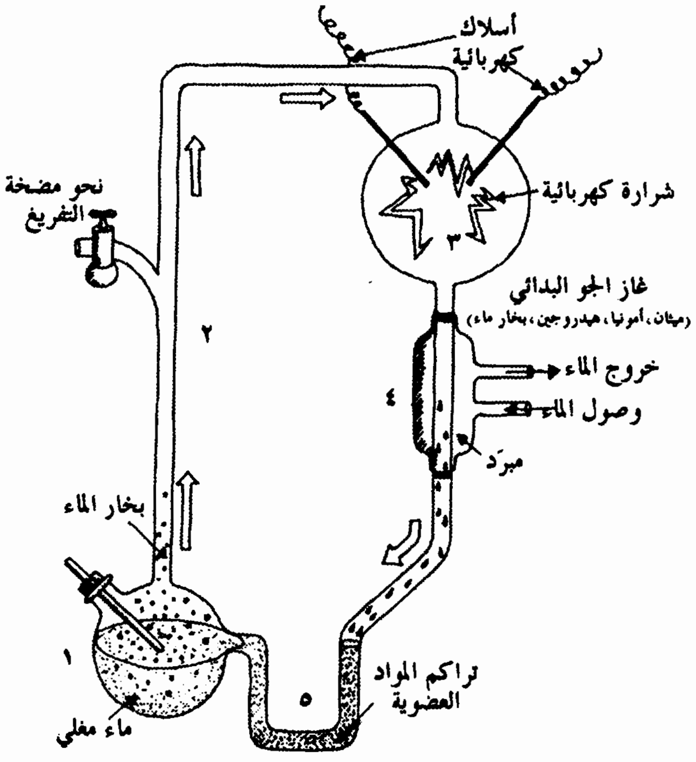
تمثّل تجربة ميلر منعرجاً في المقاربة التجريبية لمسألة أصل الحياة، لأنه نجح في إعادة خلق ظروف "التولّد العفوي" للجزيئات العضوية.

خلال الخمسينات، كان ميلر، الطالب الشاب، يعمل في جامعة شيكاغو تحت إدارة هارولد أوري Harold C. Urey الحائز على جائزة نوبل للكيمياء (١٩٣٤). كان أوري يهتم بمختلف نظريات تكوّن النظام الشمسي وخصوصاً بالتركيبة الكيميائية للغلاف الغازي الذي كان يجب أن يحيط بالأرض البدائية. وقادته نتائج أبحاثه إلى نفس الاستنتاجات التي اقترحها أوپارين قبل خمس وعشرين سنة. ذاك ما كان أوري دائما يعمد لمناقشته مع ميلر خلال "اللقاءات العلمية" التي تنعقد لهذه الغاية.

كانت فكرة ميلر، البسيطة والجريئة جداً في الوقت نفسه، تتمثّل في أن نحاكي، داخل كرة، هذا الجو البدائي الشهير للأرض وأن نقصفه بتفريغ كهربائي يجسد وميض العواصف العنيفة للعصور الغابرة. وكان ميلر يريد أن "يرى" ما يمكن أن تعطيه هذه التجربة!

كانت التجربة جريئة، لأنّه من خلال خليط الغازات الأربعة المقترحة من قبل أوپارين، يمكن نظرياً أن تتشكل كمية مُعينة من المواد الكيميائية المختلفة التي يؤدي تحليل خليطها إلى تثبيط همّة أكثر الكيميائيين مثابرة. كان ميلر، على ما يبدو، يعي بشكل جيد النقد الذي يتعرض إليه من قبل زملائه لدرجة أنّه رَكّب آلته وقام بتجربته خفيةً (انظر الرسم على الصفحة التالية).

أُحدث ميلر الفراغ داخل الجهاز. ثم أدخل فيه بعض الميثان والأمونيا والهيدروجين. بعد ذلك بلغ ماء الكرة الصغيرة درجة الغليان (١). فنتج عن ذلك الحرارة وبخار الماء. وكانت الغازات تجبر على الدوران باتّجاه الأسهم ("الغلاف الجوّي البدائي") (٢). ثم يُمرَّر الخليط في كرة كبيرة حيث تنشب خلال أسبوع شرارة ناتجة عن تفريغ كهربائيّ يعادل ٦٠٠٠٠ ڤُلط ("البرق") (٣). يبرّد بخار الماء ويتكثف في مبرّد ("الأمطار") (٤). تتجمع المركّبات المشكّلة في جزء الأنبوب الذي بشكل U ("المحيطات") (٥).



تخليق اللبنات الأولى للحياة

بعد أسبوع، فحص ميلر السائل الموجود في الجهاز، وتبيّن له أن التغيير الوحيد الذي يستحق الذكر لأول وهلة هو أنه قد تحوّل من سائل لا لون له إلى سائل بين الأحمر والبرتقالي. على ماذا يمكن أن يحتوي؟ لقد قام ميلر بتحليله بعناية، فعزل بطرق دقيقة جداً المواد المختلفة للتفاعل، فتبيّن له، على نحو يدعو إلى الذهول، أنه خلّق بذلك العديد من المركّبات العضوية وخاصة **الحموض الأمينيّة** التي من خلالها تتكوّن البروتينات، المادة الأساسية للكائنات الحية (انظر ص ٧١).

إذن أُقيم الدليل: مركّبات عضوية على درجة أولى من الأهمية ـ الحموض الأمينيّة في هذه الحالة ـ تمكنت من أن تتكون في ظروف سابقة للبيولوجيا.

سنة ١٩٥٣، ظهر في مجلة العلوم *Science* مقال تحت عنوان: «إنتاج الحموض الأمينية في ظروف كان من الممكن أن تكون هي نفس ظروف الأرض البدائية». جعل هذا المقال من ميلر رجلاً مشهوراً.

يجب وضع هذه التجربة في مكانها الصحيح. ألم نصل إلى حدّ القول إن ميلر قد نجح "تقريباً" في تخليق الحياة؟ أو أنه وُفّق، لأول مرة، في تحقيق التخليق "الصعب جداً" للحياة؟ أو أنه نجح، لأول مرة، في تحقيق التخليق "الصعب جداً" للحموض الأمينيّة(*)؟

ما هي إذن النتائج الأساسية لتجربة ميلر؟

لم يكن ميلر، بطبيعة الحال، أول كيميائي يخلّق الحموض الأمينية، لكنه أثبت بنجاح أن التكوّن "العفوي" لهذه الجزيئات (مثلما لدى بعض المركّبات العضوية).في ظروف مشابهة لظروف

(*) لا تزال مثل هذه المواقف متمسّكة بهذا الشعور القديم بالإثم إلى حد أنّ الإنسان يحسّ كل مرة بأنّه "يخفي" شيئاً معيناً عن الطبيعة. لقد عَكَس الكيميائيّ ف. وهلر F. Wohler نفس هذه الآراء المسبقة عندما حقّق لأوّل مرّة، سنة ١٨٢٨، تخليق اليوريا. فحتى ذلك الحين كنا نعتقد بوجود هذه المادة العضوية المكوّنة أساساً ـ بفضل "مبدأ حيويّ" ـعلى يد الكائنات الحيّة.

الأرض البدائية، لم تكن ممكنة فحسب، ولكن **متوقّعة**. لذلك تحقق ميلر من صحة أول دليل يدعم عليه أوپارين فرضيته، كما أنه قلب الأفكار التي نكوّنها حول فرص ظهور الجزيئات العضوية المعقدة خارج الحياة.

لم يكن "السبب الأول" للحياة، كما كنا نردّد دائماً، مجرد تأثير للأشعة فوق البنفسجية على الغلاف الجوي البدائي للأرض. وفي الواقع لا بد من أن **نفسر كيفية تكوّن هذا الغلاف الجوي**. ولا بد حتى أن نعود إلى أبعد الحدود في الزمن... فالتشكل الكثيف للمواد العضوية، في زمن معين من التطور الكوني، ما هو إلا **حلقة** في سلسلة الأسباب والنتائج تعود إلى **ما قبل** تكوّن الجوّ البدائيّ للأرض وتمتدّ **بعد ذلك** بفترة في وسط لا ينفك يتغيّر بظهور هذه المركّبات العضويّة نفسها.

عندما أثبت ميلر أننا قادرون بسهولة على محاكاة العصور الأولى للأرض في المختبر، فإنه مهّد السبيل لإعادة التكوّن التجريبي للتطوّر السابق للبيولوجيا(*)، كما قام بإرساء نظرية علمية جديدة: **الكيمياء السابقة للبيولوجيا أو الكيمياء السابقة للأحياء**. وبعد انعقاد أوّل مؤتمر نُظِّم في موسكو سنة ١٩٥٧ حول أصل الحياة، لم ينفك عدد الفرق الباحثة في هذا الموضوع يتزايد. وما لبث الإنسان، مثل فاقد الذاكرة الذي استعاد ماضيه، أن بدأ يسلّط الضوء على هذا "التاريخ المنسي لما دون الكائن"، ذلك التاريخ الذي يجب أن تبدأ فيه الحياة.

كيف يتصرّف علماء الكيمياء لإعادة بناء المراحل المتنوعة لذلك التطور الجزيئي في المختبر؟ ليس الأمر بالتأكيد أن ننتظر حتى تُنجز هذه التفاعلات بمفردها، بل يجب تسريعها والسعي هكذا إلى تقليص المدة الزمنية العظيمة التي تحتاجها الطبيعة للتحول من المركّبات

(*) يسمّيه البعض: تطوراً جزيئياً أو تطوراً كيميائياً.

الكيميائية الجامدة للأرض البدائية إلى أولى الكائنات الحية. وبالنسبة إلى هؤلاء الكيميائيين، ها هي القاعدة الذهبية: **المركّبات الضرورية للحياة الحالية كانت موجودة سابقاً في أصل الحياة**. يجب أن يكون لكل جزيء بيولوجي، مهما كان معقّداً، "أسلاف" جزيئية بسيطة جداً، مركبة من بعض الذرات مثل الغازات التي سادت خلال السنوات الأولى للحياة. فلا يوجد أي فرق بين الحموض الأمينية التي ظهرت للمرة الأولى منذ أربعة مليارات ونصف من السنوات وبين الحموض التي يمكن أن نشتريها اليوم من أي متجر للمواد الكيميائية! ونحن لسنا بقادرين على إعادة التطور البيولوجي، ولكن يمكننا، نظرياً، "باختصارنا الطريق" في الطبيعة، أن نعيد خلق التطور السابق للبيولوجيا.

تدخل شجرة التطوّر المبيّنة في ص ٢٥ ـ والتي تتشبث جذورها المقطوعة بصعوبة فوق المادة غير المنظّمة ـ في حزمة تمتد نحو الأسفل **حتى عالم الذرّات**.

لقد سعى الباحثون الذين سلكوا منذ سنة ١٩٥٣ الطريق الذي رسمه ميلر إلى الذهاب إلى أبعد من ذلك بتنويع الظروف العملية وباستعمال طرق جديدة. وقد استطاعوا، خاصة بفضل المعلومات الفيزيائية الفلكية أو الجيولوجية الموجودة بكثرة، تحديد الخصائص الكيميائية للوسط بشكل دقيق وأيضاً المصادر الطبيعيّة للطاقة في الأرض البدائية.

يجب أن يكون الوسط مائيّا أو جافاً ورطباً بالتناوب، وذا درجة حرارة متوسّطة تعادل ١٥٠ درجة مئوية، كما يجب أن يكون وسطاً مرجعاً *réducteur* (ييسّر التخليق الكيميائي) وغنياً بالأمونيا. أما مصادر الطاقة، ما عدا الشمس، فيمكن أن تتمثل بالعواصف والبراكين والحرارة الجوفية والتحلل الإشعاعي. وكان هدف الباحثين إعادة تكوين المراحل الثلاث الأساسية لأصل المنظومات الحيّة:

ـ تكوّن الجزيئات الصغيرة للحياة (كتل البناء أو المواحيد *monomères*).

ـ تكوّن الجزيئات العملاقة مثل البروتينات والحموض النووية (بوليمرات *polymères*).

ـ تكوّن الأنظمة المستقلة التي مثّلت أولى الخلايا.

كان الأستاذ ملفين كالفين Melvin Calvin، من جامعة بيركلي بكاليفورنيا والحائز على جائزة نوبل للكيمياء (١٩٦١)، أحد الأوائل الذين استعملوا المسّرع الحلقي (السيكلوترون) كمصدر للطاقة (١٩٥١). وكان يريد أن يحاكي الإشعاع المُؤيِّن *ionisant* الذي يسبّبه تحلل بعض المعادن الإشعاعيّة. وفي سنة ١٩٦١، استعمل كالفن بطريقة يحسن بموجبها متابعة الذرات "إفرادياً" أثناء تفاعلها ـ في خليط الغازات "البدائية" ـ الميثان الذي يكون الكربون فيه "موسوماً" بالإشعاعية. وبتعريض هذا الخليط إلى سيل من الإلكترونات المُسرعة جداً بواسطة السيكلوترون، استطاع كالفن تخليق الحموض الأمينية والسكر واليوريا والحموض الدهنية وأجساماً عضوية أخرى ذات أهمية بيولوجيّة كبيرة.

في الأثناء، كان يجب أن تقودنا، تجارب أخرى، أصبحت تاريخية فيما بعد، إلى نتائج غير منتظرة وذات أهمية كبيرة.

فمنذ سنة ١٩٦٠، اهتمّ الدكتور ج. أورو J. Oró من جامعة هيوستن في تكساس بالتفاعلات التي يمكن أن يعطيها حمض السيانيدريك *Cyanhydrique* مع الأمونيا(*). فقد عمد إلى خلط هذين النوعين من الغازات في الماء وتسخين المحلول لمدة أربع وعشرين ساعة على حوالي ٩٠ درجة مئوية. وقد دهش أورو عندما اكتشف أنه صنع بذلك **الأدينين** *adénine*؛ ذلك المركّب البيولوجي الأساسي الذي ينتمي إلى تركيبة الحموض النووية وتركيبة ثُلاثِي

(*) لقد تمّ فعلاً اكتشاف وجود هذه المركّبات في المذنّبات.

فُسْفاتِ الأَدِينُوزِين وكذلك تركيبة جزيئات أخرى ذات أهمية كبرى (أنظر ص ٧٦). ولأن أورو كان مقتنعاً بأنه أخطأ في تحليل مواد التفاعل، فإنه لم يتجاسر على إعادة تجربته قبل ستة أشهر.

في أغلبيّة التجارب التي أعدّت بعد ذلك، كان البحث منصبّاً على الأدينين وقد تم تخليقه. ففي سنة ١٩٦٣، استطاع الدكتور س. پونامپروما C. Ponnamperuma من قسم بيولوجيا الفضاء في وكالة النازا (يعمل بالتعاون مع كالڤين) الحصول على كميات مهمة إلى حد ما من مركّب غير متبخّر اتضح أنه الأدينين، وذلك بتعريضه خليطاً يحاكي الجوّ البدائي للأشعة في السيكلوترون التابع لجامعة بيركلي. وفي سلسلة أخرى من التجارب، استطاع الحصول أيضاً على السكّر.

بقدر ما كانت التجارب تتكرر ، بقدر ما كان يتضح أن أولى المركّبات العضوية التي تكوّنت في الخليط "البدائي" كانت عبارة عن جزيئين اثنين جد بسيطين: **حمض السيانيدريك والفورمالدهيد** *formaldéhyde* (انظر الرسم ص ١٢٧)، وذلك بغض النظر عن طبيعة مصدر الطاقة المستخدمة.

هذان النوعان من الغازات معروفان جيداً. فلحمض السيانيدريك شهرة محزنة لأنه، نظراً إلى سمّيته الشديدة، يُستعمل غازاً مخنقاً. أما الفورمالدهيد، فإننا نستعمله غالبا كمحلول في الماء (الفورمول) لتصبير (حفظ) الأعضاء.

هذان الجزيئان البسيطان مهمان جداً. وبسبب تفاعليتهما الشديدة، فقد كان من المؤكد أن يكونا العنصرين الوسيطين اللذين تتكون انطلاقاً منهما أهم الجزيئات البيولوجية.

ولدعم هذه الفرضية، أخضع پونامپروما حمض السيانيدريك المحلول في الماء إلى تأثير مصباح ذي أشعّة فوق بنفسجية لمدة أسبوع واحد: فحصل بذلك ليس فقط على الأدينين ولكن أيضاً على **الغوانين** *guanine*، وهو أحد "الحروف" الأربعة التابعة للرمز الجيني

(انظر ص ص ٧٦ ـ ٧٨)، وكذلك على اليوريا.

وبتكرار العملية ذاتها مع الفورمالدهيد، قام كل من پونامپروما وأورو، سنة ١٩٦٣، كل واحد منهما بمعزل عن الآخر، بتخليق الريبوز والديوكسي ريبوز، وهما نوعان من السكر، يملكان خمس ذرات من الكربون ويدخلان في تركيبة الحموض النووية وثُلاثِي فُسْفاتِ الأَدِينُوزِين. إذا أضفنا الفورمالدهيد إلى نفسه، ينتهي بنا الأمر أيضاً إلى سكر ذي ست ذرات نعرفه جيداً: الغلوكوز.

مكّنت التجارب المنجزة في سنتي ١٩٦٨ و١٩٦٩ والتي تستخدم الفسفات ومتعدّد الفسفات غير العضويّين -المنتجة أيضاً بمحاكاة البيئة البدائية ـ من إثبات أن تفاعلات التكثّف المؤدّية إلى بوليمرات ذات فائدة بيولوجية يمكن أن تتحقق في محلول مائي وعند درجات حرارة متوافقة مع درجة حرارة الحياة الحالية.

وكان لا بد من انتظار سنتي ١٩٧٨ و١٩٨٠ لكي تتحقق تجربتان حاسمتان تثبتان كيف أنه بالإمكان التحول من جزيئات صغيرة من الأسلاف (مواحيد) إلى جزيئات الحياة العملاقة للحياة (بوليمرات). فقد نجح نوام لاهان Noam Lahan، من الجامعة العبرية في رُحوبوت (فلسطين المحتلة)، ومساعدوه في إنتاج سلاسل من الحموض الأمينية (ببتيدات) لها٢٠ إلى ٣٠ وحدة انطلاقاً من الغليسين الموضوع في ظروف جافة ورطبة بالتناوب وبوجود الطين. وفي ظروف مشابهة، تحصّل لسلي أورجل Leslie Orgel ور. لورمان R. Lohrman، من معهد سالك Salk Institute بسان دييغو، على سلاسل قصيرة من الحموض النوويّة (أوليغو ـ نوكليوتيد) من٣٠ إلى ٤٠ وحدة قادرة بدورها على تسريع تكوّن سلاسل أخرى أطول منها. تثبت هذه التجارب أن بإمكاننا محاكاة تبخير البحيرات أو البرك التي كان من الممكن أن تحدث على الأرض البدائية (وسط جاف وحار بالنهار، وبارد ورطب بالليل) أو تجفيفها أو إعادة تمييهها. ففي مثل هذه الظروف، سمح كل من تعاقب الدورات

المنتظمة ووجود الطين (لإبقاء الجزيئات في مكانها) بتكوين سلاسل طويلة من الجزيئات تمثّل سلفاً البروتينات أو الحموض النووية لخلايانا.

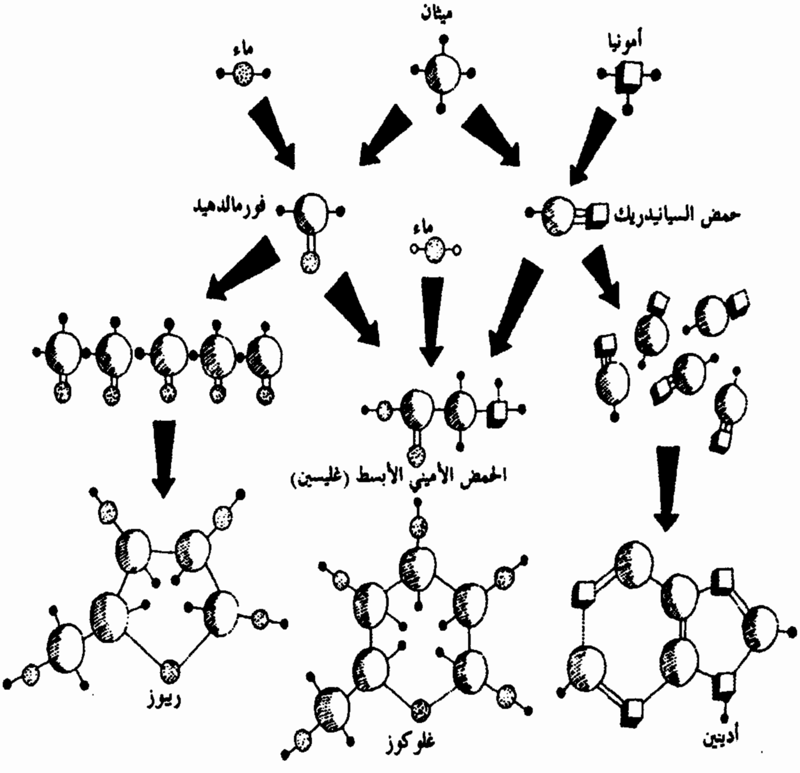
يمكن أن نعتبر اليوم أنه بفضل أعمال أ. كاتشلسكي A. Katchalsky، وأورجل وأورو وبونامپروما ورابينوفيتز وساغان وشتاينمان، كان بالإمكان تخليق الأغلبية القصوى من أنواع الجزيئات الأساسية للكائنات الحيّة (بما فيها الشحوم ـ الدهنيّات ـ التي لها أهمّية كبرى في أصل الحياة) بطرق لاحيويّة صرفة(*).

وفي نفس الوقت الذي قام فيه علماء الكيمياء بصنع "لبنات الحياة" في المختبر، اكتشف الفيزيائيون الفلكيون بكل دهشة (بمراقبة المذنّبات وتحليل الأحجار النيزكية أو بالقياسات بواسطة المقراب اللاسلكي) أن الكون كان معموراً بجزيئات عضوية أكثر تعقيداً مما كنّا نتصور. وخلال خمس عشرة سنة، نجحوا في التعرف إلى ٧٠ جزيئاً عضوياً في الفضاء لها تراكيب بسيطة جداً بقدر بساطة تراكيب الكحول أو الفورمالدهيد، أو معقدة جداً بقدر تعقّد السيانوترياستيلين أو بوليمر الفورمالدهيد (POM أو *polyoxyméthylène*) الذي اكتُشف في مارس ١٩٨٦ بواسطة المسبار جيوتو Giotto في نواة المذنّب هالي. لقد قُدّم الدليل على الأصل الفضائي لهذه الجزيئات العضويّة سنة ١٩٨٧ بدراسة الحموض الأمينيّة الموجودة في الحجر النيزكي لمورشيسون الذي سقط في أستراليا منذ ثماني عشرة سنة. وقد أثبت الباحثون في كالتك Caltech وفي جامعة أريزونا أنّ الحموض الأمينيّة تحتوي على نظائر من الهيدروجين والنتروجين، النادرة على الأرض ولكن الموجودة بكميات وافرة في سحب الغبار الواقع بين النجوم. يبدو إذن أن تكوّن الجزيئات البيولوجية (أو على الأقل البعض من

(*) عديد الببتيد، قواعد نوويّة، عديد النوكليوتيد، سكّر، أصباغ، فسفات... توجد بيبليوغرافيا تجمع ما بين أكثر من ألف مرجع أصدرها م. و. وست M. W. West و س. بونامپروما (انظر ثبت المراجع في آخر الكتاب).

مكوّناتها) ظاهرة منتشرة جداً في فضاء ما بين النجوم.

يلخص الرسم التالي التفاعلات المهمّة التي أعيد إحياؤها داخل المخابر. فهو يمثّل، إذا صح القول، أول فروع "شجرة التطور الجزيئي" التي يسعى علماء الكيمياء إلى إعادة تكوينها وربطها بشجرة التطور البيولوجي.



وحرصاً على التبسيط، لم نبيّن في الرسم سوى مواد الانطلاق والوصول. ونلاحظ أن هذه المواد النهائية (التي ستدوم وتتراكم) تنتج عموماً بإضافة الفورمالدهيد أو حمض السيانيدريك إليها باعتبار أنها

متفاعلات وسيطة. ويمكن أن نتأكد من ذلك بإحصائنا مثلاً لعدد الذرّات الموجودة في ٥ جزيئات من الفورمالدهيد ـ ٥ ذرات كربون و٥ ذرات أكسجين و١٠ ذرات هيدروجين ـ وعدد الذرات في جزيء الريبوز: أعداد مطابقة. والأمر نفسه بالنسبة إلى الأدينين.

وحرصاً على تخفيف الرسم لم نورد بقية المركّبات من نفس العائلة التي تم الحصول عليها في ظروف سابقة للبيولوجيا (أنواع أخرى من السكر، حوالى عشرين حمضاً أمينيّاً، وقواعد أخرى: غوانين، تيمين، يوراسيل، سيتوزين).

عَقِب التجارب المهمّة التي سبق وصفها بسرعة، تتحتم علينا ذكر ملاحظة أولية: إذا كانت الجزيئات الوحيدة التي تتكون بكميات ملحوظة هي "بحق" نفس جزيئات الحياة (الحموض الأمينية والأدينين والسكّر...)، فربما يكون ذلك دليلاً على أنّ مثل هذه الجزيئات لا تريد سوى الظهور! هذه النقطة مهمة جداً. وفي حالة تفاعل كيميائي، عندما تُحدّد بعض الظروف منذ البداية، لا تتغير الأصناف المختلفة للمواد التي يمكن أن تتكوّن إلا في حدود ضيقة جداً. والواقع أن هذه الحالة هي بالضبط حالة الأرض البدائية لأن تركيبة غلافها الجوي وطبيعة مصادرها الطاقيّة تعتمد على التتابع العنيف للظواهر السابقة. يمكننا القول إذن **إن احتمال تكوّن الحموض الأمينية والأدينين أو السكّريات، في ظروف معيّنة** (ظروف الأرض البدائية)، **كان قوياً جداً وأقوى بكثير مما كنا نتصور قَبْلياً.**

من جهة أخرى، يكون المكان الذي تتراكم فيه هذه الجزيئات غير سكوني: فهو يتغير باستمرار بفضل النقل المستمر للطاقة المتأتية ـ في أشكال متنوّعة– من الشمس. ففي هذه الظروف، كما لاحظ الأستاذ بوفي R. Buvet، يمكن للجزيئات المعقّدة (أي غير المستقرة من وجهة نظر الديناميكا الحرارية) التي ستتفكك في بيئة سكونية (منظومة معزولة) أن تدوم أو حتى تتعقّد أكثر في الوسط الديناميكي

الذي هو الأرض البدائية نفسها. فالأدينين، مثلاً، يُعتبر مادة مستقرة جداً. وهي تحتمل جيداً الأشعة فوق البنفسجية. لكن، بامتصاصها تلك الأشعة، ستحاول التفاعل مع جزيئات أخرى والتخلص بالتالي من الطاقة الزائدة التي تحدّ من استقرارها. يميل الأدينين إذن للتعقيد تحت تأثير الإشعاعات.

إذن، وحدها الجزيئات القادرة على الدوام والدخول في تركيبات ذات نسق مرتفع تجد حظوظاً لتكون محفوظة بالانتقاء الطبيعي. وتجدر الإشارة إلى أن هذه الجزيئات تفرض نفسها لأنّ الأمر يتعلّق **بالانتقاء الذاتي** *autoselection* وليس "باختيار" خارجي.

وعلى الرغم من استقرارها الديناميكي وقدرتها على التعقُّد، يجب، في الأثناء، أن يكون لهذه الجزيئات العضوية الوقت الكافي لتتفاعل الواحدة مع الأخرى وأن تشكل بالتالي قاعدة مهمّة بما يكفي لبقية التطور السابق للبيولوجيا. ومن الممكن أن تكون هنالك خصائص أخرى للوسط قد ساعدت على مثل هذا "البقاء" للجزيئات. وفي الحقيقة فإن:

- المركّبات الثقيلة، التي تتكوّن في الغلاف الجوي العالي، تسقط نحو طبقات أكثر انخفاضاً وأكثر كثافة وهي تغرق في الماء أو تتراكم في حفر وشقوق الأرض، **ما يحميها من التلف** بفعل الأشعة فوق البنفسجية.

- إذا كانت بعض الجزيئات تلعب دور **حفّازات التغيير**، يمكن لتركّزها في نظام ثابت أن يرتفع بسرعة كبيرة.

- **لم يكن هنالك وجود للأكسجين** في الغلاف الجوي للأرض. ونتيجة لذلك، كان بإمكان المركّبات العضوية، التي "تتعفّن" اليوم بسرعة بفعل الأكسدة في الهواء، أن تُحفظ **لمدة أطول**.

- أخيراً، **لا وجود لأي كائن حي** قادر على إتلاف المواد العضوية كما هو حاصل اليوم.

إذن ما من شيء يمنع الجزيئات العضويّة من التراكم على الأرض أو في البحيرات الشاطئيّة أو في البحار البدائية، ومن مواصلة التفاعل خلال مئات الملايين من السنين.

- ٢ -

نماذج أولية من الخلايا

تواصل الجزيئات العضوية المُكوَّنة حديثاً والسابحة في دفق من الطاقة التي ترسلها الشمس تأثيرها الواحدة على الأخرى، كما تواصل عملية تشعبها وتغيير ظروف البيئة: تكتسب المادة العضوية خصائص جديدة تجسّد مسبقاً خصائص الكائن الحي. ولتوضيح هذه الخصائص، يمكننا أن نختار بشكل اعتباطي بعض أنواع الجزيئات المعقّدة كلاً على حدة: جزيئات قادرة على **أن تكبر وتتكاثر وتوجّه الطاقة من بعد وتنعزل عن الماء وتنظّم نفسها بنفسها.**

من الواضح أنّ المادة العضوية تتطور **بشكل إجمالي**، ويذكّر هذا الوصف قليلاً أيضاً بذلك الذي يعنى بإعادة رسم تاريخ المكبس والحارق والمُوَلّد، لتفسير ظهور أول محرّك! لكنه يملك ميزة إثبات كيف تسنّى لهذه الجزيئات الأساسية للحياة، والتي تعرّضنا لها في القسم الأول، من أن تظهر في الوسط البدائي.

هذه الجزيئات لا تقبل الانفصال عن البيئة التي تتواجد فيها: بحار، بحيرات، مستنقعات جافّة ورطبة على التناوب، شقوق تحميها من الأشعة فوق البنفسجية. لكنها تستوجب خاصّة وجود بنى معيّنة تُسرّع تنظيم المادة العضوية. هذه البنى هي عبارة عن سطوح معدنيّة تموضع الجزيئات في الفضاء، وحويصلات مجوّفة تعزلها أو تركّزها. وبداخلها يمكن أن تُنتقى المهام الأساسيّة للحياة: المحافظة الذاتيّة بتحويل الطاقة الشمسية، والتوالد الذاتي "بابتكار" الرمز الجيني، والتنظيم الذاتي

بوصل شبكات "أسلاف" الأنزيمات. هذه المراحل الأساسية سوف تُفصّل فيما بعد. والمهم هو الحفاظ على حضور البيئة والجزيئات قيد التطور في أذهاننا. وستكون بدايتنا الكوكب الفتيّ: الأرض.

الأرض الأمّ

لا بد وأن الأرض كانت ساخنة جداً في بداية تكوّنها، وأن طبقات الحمم المتأتّية من البراكين لم تكن قد بردت بعد. من جهة أخرى، من المحتمل أنه كانت تطفو طبقات من المعادن القادرة على دعم بعض التفاعلات الكيميائية والحفاظ عليها. آنذاك، كان بالإمكان حدوث تخليق مركبات عضويّة أكثر تشعّباً على سطح الأرض وعلى مقربة من مناطق النشاط البركاني.

ولا بدّ أن مياه الأمطار كانت تجرف جميع المواد العضوية المعقّدة التي تكوّنت على القِشرة الأرضية. فقد كانت تترسب فيها هذه المواد المنجرفة بتيّارات الماء نحو البحيرات أو المستنقعات أو البحار قيد التكوّن. هذا "الحساء" من المواد العضويّة الغنيّة بالأملاح والسكّر الذائب، سماه العالم البيولوجيّ البريطاني هالدان الحساء البدائي الساخن".

ماذا كان يحدث داخل مثل هذا "الحساء"؟

ففي هذا المكان الجديد كلّياً - في تلك المرحلة من التطوّر الكوني - سيتلاحق ويتسارع التغيير الكيميائي للمادة العضويّة.

فالماء هو في الواقع مذيب شامل. إنه يذيب العديد من المركّبات العضوية والأملاح، ما ييسّر اللقاء بين الجزيئات الفردية ويزيد من حظوظ التفاعلات الكيميائية.

ومع ذلك، فإن الجزيئات العضوية التي تتفاعل وتزداد تعقيداً لا تتعلق ببعضها البعض في أي مكان: فهي تحمل في بنيتها الكيميائية بعض المجموعات من الذرّات الأكثر تفاعلاً من غيرها. ونحن

نسمّيها المجموعات الوظيفية. وينتج تعلّق جزيئين معاً، في أغلب الأحيان، عن تصادم بين مجموعتين وظيفيّتين. ومع ذلك، ففي الحساء البدائي، كانت فرص اللقاء في المكان "المناسب" ضعيفة إلى أقصى حد لأن الصدمات تظهر بالصدفة. بخلاف ذلك، تحدث التفاعلات الحيويّة لدى الكائنات الحيّة في لمح البصر، وتبقى الأجزاء المتفاعلة في مكانها إلى أن يحدث التفاعل بواسطة حفّازات عضوية: الأنزيمات.

في مرحلة أولى من التطوّر الجُزيْئي، من المحتمل جداً أن تكون بعض الحفّازات المعدنيّة قد لعبت هذا الدور. يكون للبعض من السطوح أو الأيونات المعدنيّة(*)، فعلاً، خاصية تثبيت الجزيئات العضوية وترتيبها وفق نظام يسهّل إطلاق تفاعلات التعلّق الكيميائي. ويمكن للأيونات الموجودة في الماء، مثل أيونات المغنيزيوم أوالزنك أو الكلسيوم أو النحاس، أن توجّه جزيئات الحموض الأمينية، مثلاً، إلى بنى منظّمة. فهي تقرّب بعض المجموعات المتفاعلة وتلعب بهذه الطريقة دوراً تحفيزياً. يمكننا العثور على الأيونات المعدنية في أغلبية تميمي الأنزيمات *co-enzymes*، تلك العناصر المرتبطة بالأنزيمات والضرورية لعملها. ففي هذه الأمكنة المحددة التي سمّاها العالم الفيزيائي البريطاني برنال J. D. Bernal، وحدات "دون حياتية"، ستسود إذن حركة كيميائية كبيرة. وقد تمكنت طبقات من الطين أو التراب أو الحمم من لعب دور السطوح المنشّطة. ففي عام ١٩٧٠، أبرز أ. كاتشلسكي من معهد وايزمان (في فلسطين المحتلة)، دور بعض أنواع الطين، مثل المونموريونيت، في تَكاثُف الحموض الأمينية في شكل سلاسل متعددة الأمينات، وهذا ما جرى تأكيده سنة ١٩٧٨ بواسطة لاهان ومن بعده سنة ١٩٨٠ بواسطة لسلي أورجل فيما يتعلّق بالحموض النووية. إذ إنه من الممكن، كما اقترح

(*) الايون هو ذرّة خسرت أو ربحت إلكترونات.

أيضاً برنال، أن تكون الحركة التحفيزيّة للطين أو الصوّان قد أدت، اعتباراً من هذه المرحلة، إلى تكوين جزيئات لامتماثلة، تُعتبر من ميزات المادة الحيّة(*). وكما قال أ. دوفيلييه A. Dauphillier، فإنّ «اللاتماثل الجزيئي، الذي يُعتبر أساس الحياة، كان مشروطاً بالوجود المسبق للاتماثل الموجود في الشبكة البلّوريّة، ويتوافق ذلك تماماً مع التطوّر الجيولوجيّ». تجدر الإشارة في النهاية، إلى الدور الأساسيّ للشحوم (الدهنيات) التي تكوّن قطيرات مستحلَبة في الماء تشكل حويصلات مجوّفة لا تحصى حيث يمكن لبعض الجزيئات أن تتركّز وتتفاعل بداخلها. ما هي مواد آلاف التفاعلات التي تحدث في نفس الوقت على الأرض أو في البحار؟ إنها جزيئات معقّدة تجسّد خصائصها مقدّماً جزيئاتَ الحياة؟

أسلافنا الجزيئات

جزيئات "كيميائيّة":

للحموض الأمينيّة (انظر ص ٧١) "جهاز تعلّق كيميائي" مزدوج يسمح لها بالاتحاد مع جزيئات بسيطة من نفس النوع لتكوين سلاسل طويلة: البروتينات. وقد توصل اليوم العديد من المختبرات إلى إثبات أن هذه الجزيئات العملاقة يمكن لها أن تتكون في غياب الكائنات الحية بشكل اتحاد في شكل سلسلة، وعلى سطوح منشّطة، للحموض الأمينيّة المصنوعة في الغلاف الجوي البدائي للأرض.

توصّل الأستاذ س. و. فوكس S. W. Fox من جامعة ميامي بفلوريدا إلى الحصول على "أسلاف البروتينات" (التي سمّاها شبيهات البروتين(**) *protéinoïdes*) عن طريق تسخين خليط من

(*) مثلما توجد يد يمنى وأخرى يسرى، توجد أيضاً جزيئات يمنى ويسرى، صيغها ليست قابلة للتراكب. تكون الجزيئات التي تُكوّن المادة الحيّة من نفس النوع. لكن أسباب هذا اللاتماثل الجزيئي لم تُوضّح بعد.

(**) شبيه البروتين هو بروتين غير بيولوجي.

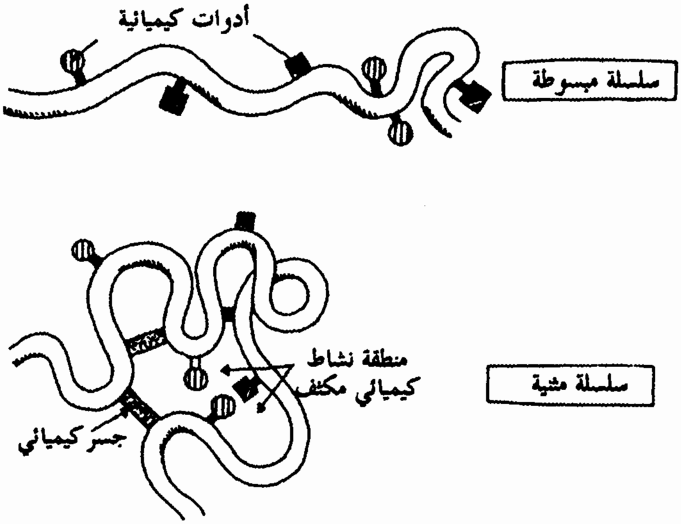
الحموض الأمينيّة. وتمتلك بعض شبيهات البروتين نشاطاً تحفيزياً ضعيفاً. ويعتقد فوكس أن الانتقاء الطبيعي قد حفظ الحفّازات الأكثر تكّيفاً من غيرها لهذه الوظيفة الكيميائية أو تلك للوصول في نهاية المطاف إلى هذه الآلات الجزيئية الحقيقية، ألا وهي الأنزيمات.

وحتى اليوم لم يتضح أصل البروتينات تماماً. ويعتقد بعض الباحثين أن البروتينات قد تمكّنت من التكوّن مباشرة بدون حموض أمينيّة وسيطة، وذلك من خلال اتحاد جزيئات صغيرة، مثل حَمْض السيانيدريك في شكل سلسلة. وقد ذهب بعضهم الآخر إلى أن البروتينات كان بإمكانها أن تتطوّر إثر تضاعف متعاقب لنماذج أصلية بسيطة جداً، مركّبة فقط من بعض الحموض الأمينية ومكوَّنة في ظروف منافية للحياة. كيف أمكن للنشاط البيولوجي للأنزيمات أن ينطلق؟ يمكن تشبيه سلسلة متواصلة من الحموض الأمينيّة المرتبطة الواحدة بالأخرى، بشكل تقريبي، بسناد ليّن تتعلّق فوقه أدوات متنوّعة. يتكوّن سناد الجزيئات تبعا لتسلسل منظّم من الحموض الأمينيّة.

والواقع أنّ هذه السلسلة الجزيئيّة و"الأدوات" التي تحملها لا تُنتظم بصفة عشوائية في الفضاء: ففي الظروف العادية، الملائمة لوجودها، تلتف السلسلة عموماً حول نفسها مشكِّلة نوعاً من "النابض". يسمى هذا النابض **لولب ألفَا**. وهذا الشكل الخاص يجعل الجُزَيْء الضخم أكثر استقراراً فتزيد، إذن، حظوظ وجوده.

يبقى "النابض" في وضعية مضغوطة ببعض المجموعات من الذرّات التي تتواجد بصفة دورية الواحدة أمام الأخرى وتلعب دور مشابِك صغيرة. بدوره يمكن لهذا النابض (أو السلسلة الملتفّة) أن يتكوّم في شكل كُرَيّة صغيرة جدّا تمتلك شكلاً خاصاً بكل نوع من البروتينات. يحدث هذا التكوّم بسبب بعض الحموض الأمينيّة القادرة على خلق جسور كيميائية في بعض الأماكن، بين الْتِفافات السلسلة.

ولكن الأهم من ذلك هو أن طيّة السلسلة هذه تجبر بعض "الأدوات" الكيميائية، التي توجد بالرغم من ذلك بعيدة جداً الواحدة عن الأخرى على السلسلة المبسوطة، على أن تكون مجمّعة في نفس المكان من الكُريّة: بذلك يمكن أن يتكوّن مقرّ فاعل أو نشط تحصل فيه بعض التفاعلات الكيميائية بسرعة هائلة. إنها قاعدة حركة الأنزيمات.



جزيئات لها ذاكرة:

لقد نجحنا في تخليق الأدينين والريبوز (أنظر ص ١٢٥) في ظروف سابقة للبيولوجيا. ويجب الآن إقامة الدليل على أنْ تَكوّن النُوكْلِيُوتيد(*) *nucléotide* يمكن الحصول عليه بطرق "طبيعية".

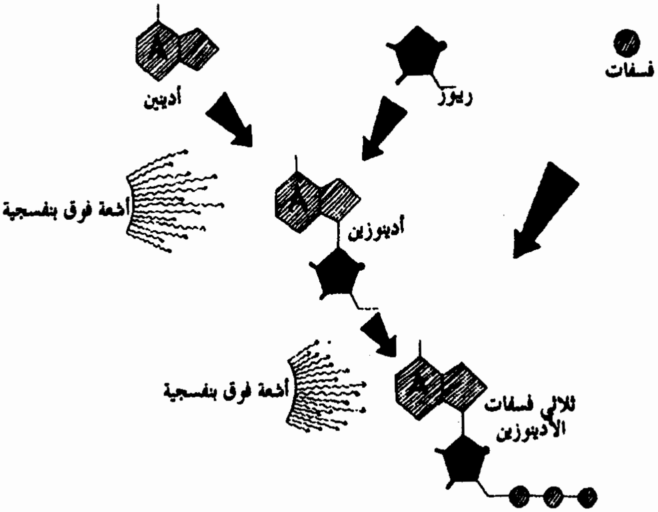
سنة ١٩٦٣، وإثر اقتراح من الدكتور ساغان، جرّب الدكتور بونامپروما تشعيع محلول من ماء الأَدِينين والريبُوز وحمض الفسفور

(*) وحدة بناء انطلاقاً منها تنبني الحموض النوويّة (انظر الملحق ٢).

بواسطة الأشعة فوق البنفسجيّة. وقد استنتج، آنذاك، أنّ الأدينوزين يتكوّن بسرعة كبيرة.

بعد ذلك، وبتغيير طبيعة المركّب الفسفوري وتشعيع الأدينوزين، نجح ساغان وپونامپروما، في تحضير ثُلاثِي فُسْفاتِ الأَدِينُوزِين (ATP) بمردود عال، وهذا الجزيء الهام جداً، يعتبر أساس كل التفاعلات الطاقيّة الحيويّة(*).

وتجدر الإشارة إلى أن هذين الباحثين قد تركا، على هذا النحو، ثُلاثِي فُسْفاتِ الأَدِينُوزِين يتكوّن "بمفرده". فقد اكتفوا بخلق الظروف التي يُفترض أن تكون أصليّة. وكان ثُلاثِي فُسْفاتِ الأَدِينُوزِين الذي تم الحصول عليه "بالتولّد العفوي" مطابقاً من جميع النواحي لذلك الذي نجده لدى الكائنات الحيّة.

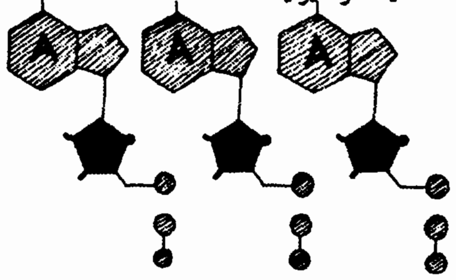


(*) في الواقع، تحصّل ساغان وپونامپروما، في نفس الوقت، على أحادِيّ فُسْفاتِ وثنائي فسفات وثُلاثِيّ فُسفات ورباعيّ فسفات الأدينُوزِين.

ومنذ عهد قريب جداً، تحصّل پوناميروما على جميع ذرّات النُوكْلِيُوتيد التي تم العثور عليها عموماً في الحموض النوويّة. فقد تم إذن تحضير القطع المفكّكة لهذه الجزيئات الضخمة، والتي نعرف أهميتها البيولوجية، في ظروف مشابهة لتلك التي كان يجب أن تحكم الأرض البدائية. بقي إذن أن نفسر كيف استطاعت هذه القطع أن تتّحد لتكوين عدِيْد النوكليوتيد *polynucléotide*، الذي هو "سلف" الحموض النووية.

ويعتقد البروفسور ج. شرام G. Schramm من جامعة ماكس ـ بلانك في توبنغن بألمانيا بضرورة وجود طبقات مهمّة من الفسفات في المناطق الجافّة من الأرض البدائيّة. فقد قام بتسخين النوكليوتيد إلى حوالى ٦ درجات مئوية مع مُشتّق من حمض الميتافسفريك وحصل بذلك على ترابط جزيئي يحتوي على عشرات الذرّات من النوكليوتيد المترابطة الواحدة بالأخرى.

لكن التجارب الحاسمة كان من المفروض أن تتحقّق اعتباراً من سنة ١٩٨٠ في معهد سالك بسان دييغو على يد لسلي أورجل Leslie Orgel وفريقها. فقد أثبت هؤلاء الباحثون في البداية أنّ سلاسل الحموض النوويّة التي يتراوح طولها بين ٣٠ و ٤٠ وحدة يمكن أن تتكوّن انطلاقاً من القواعد الأربع المتولدة في ظروف الأرض البدائية. لذلك



يجب محاكاة دورات التجفيف والإرواء في المستنقعات أوالبحيرات والقيام بالتجارب بوجود ذرات معدنية من الرصاص أو الزنك.

بعد ذلك، أثبتت أورجل أن سلاسل الحموض النوويّة "البدائيّة" وحتىّ البروتينات البدائية قادرة على تحفيز تكوّن سلاسل أطول جديدة من الحموض النووية. وهكذا تم التوصل إلى توضيح الآلية التي تسمح بولادة "الذاكرة" الوراثية للكائنات الحية.

ومع ذلك، فإن نظام المتواليات المتحصَّل عليها ظل فَوضَوِيّاً بالتأكيد. فهو لا ينتمي لأيّ "رمز" بيولوجي. وبين عَدِيْد النوكليوتيد الخاص بأورجل وحَمْض الريبونوكلييك (رنا) البيولوجي يوجد تقريباً نفس الفرق ما بين

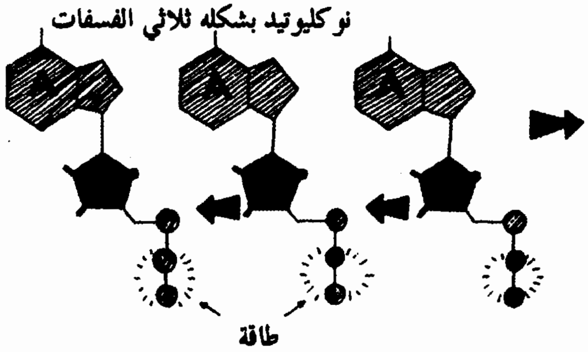
منه ياة ي هرة ج ظادّ ظَمالحة

و

الحياة هي ظاهرة جدّ منظّمة

رغم أنّ حروف السطرين متطابقة تماماً.

فنحن لا زلنا بعيدين عن الثلاثة مليون زوج من النوكليوتيد التي تكوّن حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك التابع للبكتيريا وبعيدين أيضاً عن تشعّب الرمز الجيني نفسه.



جزيئات تتوالد:

يمكن للتفاعل الكيميائي أن يتسرّع بواسطة حفّازات ناتجة عن البيئة. لكن هناك أيضا تفاعلات تسرّع نفسها بنفسها: **إذ تحفّز مواد هذه التفاعلات تكوينها الذاتي!** هذه الظاهرة، التي تبدأ ببطء وتنتهي أحياناً بانفجار عنيف، معروفة جداً في صفوف علماء الكيمياء: إنها **التحفيز الذاتي** *autocatalyse*.

لنأخذ مثالاً نموذجياً هو التفاعل الذي تمكّن من الحدوث في ظروف سابقة للبيولوجيا: تخليق البُرفيرين(*) *porphyrines*.

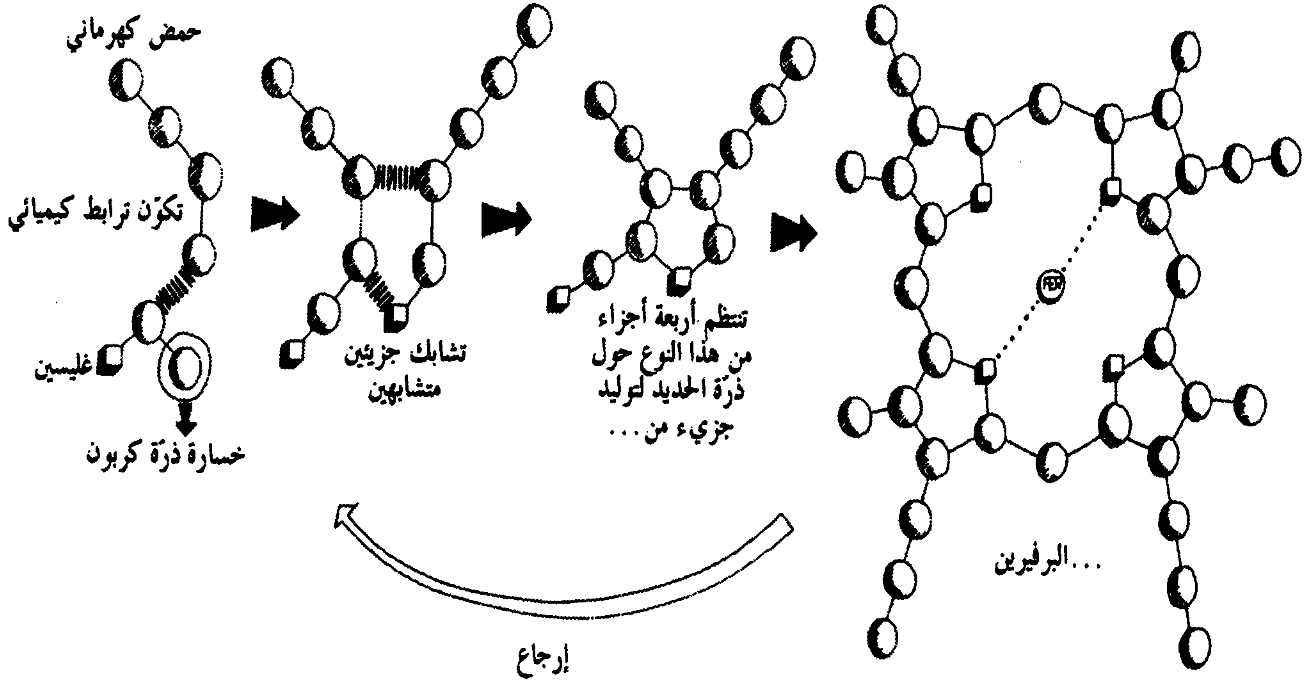
ينتج هذا الجزيء الضخم عن تجمّع وحدات صغيرة وبسيطة جداً وفق مراحل متتالية (ظهرت بلا شك خلال عمليّات التخليق العضوية الأولى): حمض أمينيّ، **والغلِيسين، والحَمْض الكَهْرَمانِيّ** *acide succinique* (انظر الرسم على الصفحة المقابلة).

كان بإمكان الآلاف من عمليات التخليق من هذا النوع أن تحدث في وقت واحد في الوسط الأصلي(**). إذن، يوجد في نفس الوقت عناصر للبداية و"قطع مفكّكة" وسيطة ناتجة عن المراحل التي لم تنجز بعد.

يمكن في الأثناء لبعض المراحل أن تتسرّع بمفعول حفّازات خارجية موجودة في الوسط **كالحديد**. لكن التلاقي ما بين الجزيئات يتمّ بالصدفة وتبقى التراكيب رغم كل شيء بطيئة جداً. لنتصور إذن أنه بعد مضي فترة طويلة تم تخليق جزيء أوّل من البُرفيرين - يحمل في نواته ذرة من الحديد. **بما أنه هو نفسه عبارة عن حفّاز ذي فاعليّة خارقة**، سيقوم مباشرة بتسريع تكوّن جزيء ثانٍ مشابه.

(*) يعتبر اليخضُور (راجع ص ص ٥٨ - ٥٩) وهِيم الهيموغلوبين (راجع ص ٧٣) ونواقل إلكترونات المتقدّرات جزءاً من هذه العائلة الضخمة للبُرفيرين

(**) كان من الممكن أن تتحقق مثل هذه التراكيب، بعد أن تحصل في "الحساء البدائي"، أو في الطين، بسرعة هائلة داخل أجهزة محدّدة بغشاء


حمض كهرماني
تكوّن ترابط كيميائي
غليسين
خسارة ذرّة كربون
تشابك جزيئين
متشابهين
تنتظم أربعة أجزاء
من هذا النوع حول
ذرّة الحديد لتوليد
جزيء من . . .
. . . البرفيرين
إرجاع

وسيتولى هذان الجزيئان من البرفيرين بعد ذلك تحفيز تكوّن جزيئين أخريين، يقومان بدورهما...، وهلم جراً. تتكوّن بالتالي، وبسرعة، ٤ ثم ٨، فـ ١٦، فـ٣٢ جزيئاً من البرفيرين انطلاقاً من "القطع المفكّكة" الموجودة في الوسط. ويرتفع عدد جزيئات هذا النوع بسرعة فائقة.

ويصح القول نفسه بالنسبة لجزيئات حَمْض الريبونوكليك (رنا) التي يمكنها أن تسرّع تكوينها الذاتي انطلاقاً من قطع مفكّكة. يمكننا القول أيضاً إن هذا النوع من الجزيئات يبدأ فجأة "بالتكاثر". وكما أشار إليه ملفين كالفين، فإن مفهوم التحفيز الذاتي، مهما كان تافهاً، يُعتبر في جوهره **المفهوم البيولوجي للتوالد**(*). ومهما ظهر ذلك غريباً، فقد "اخترعت" الطبيعة التوالد إذن **قبل** الكائنات الحيّة.

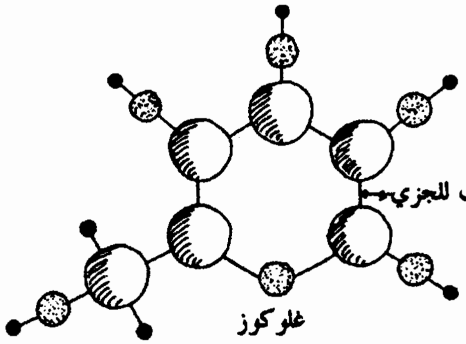
جزيئات تقود الطاقة:

لقد لاحظنا دون شك، على الرسوم المجسّدة للجزيئات (أنظر ص ١٢٧)، أن بعض الذرّات كانت مربوطة بخيطين أو حتى بثلاثة خطوط في حين لم يكن يربط بين بعضها الآخر غير خيط واحد. ويعني ذلك أن بإمكان الذرّات أن ترتبط ببعضها البعض بواسطة زوج أو اثنين أو ثلاثة **أزواج من الإلكترونات**، بحيث تكون هذه الأزواج مشتركة. هذه الأنواع المختلفة للترابطات تسمى: ترابطاً بسيطاً -، أو مزدوجاً =، أو ثلاثياً ≡.

من بين العناصر الطبيعية التسعين، لا يقدر سوى القليل منها فقط على توفير ترابطات مزدوجة أو ثلاثية **مستقرّة**. وهذه العناصر هي التي تلعب بحق دوراً كبيراً في المادة وتفاعلات الحياة، وهي **الكربون والنتروجين والأكسجين**، وإلى حدّ ما **الفسفور والكبريت**.

(*) يُستعاد بنسق أسرع من الأصلي. تمتلك عدّة أنواع من الجزيئات الأصليّة مثل هذه الخصائص من التحفيز الذاتيّ.

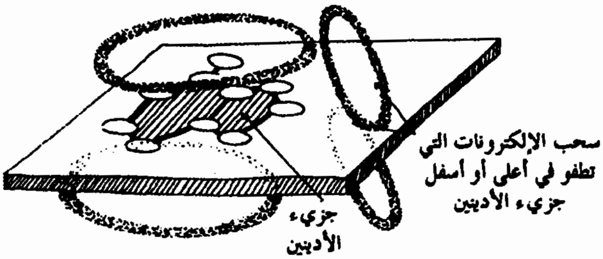
ولهذه الترابطات المتعددة أهمية كبرى فيما يتعلّق بالآليّات البيولوجية: فالشكل الحيّزي للجزيء يتحدد **بهيكل صلب** مؤلف من ترابطات بسيطة. وتبقى الإلكترونات حبيسة هذه الترابطات ولا يمكن لها أن تفلت بدون تغيير فوري لشكل الجزيء برمّته.

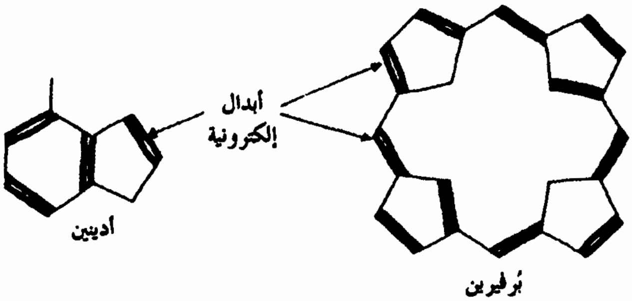


بالمقابل، يواصل اثنان من الإلكترونات، في الترابط المزدوج، تأمين الرباط الصلب بين الذرات. لكن الاثنتين الأخريين تطفوان طليقتين في أعلى وأسفل الترابط وتكوّنان نوعاً من **سحابة كهربائية صغيرة** ذات خصائص مستقلة تماماً.

وبالفعل، يمكن للعديد من الترابطات المزدوجة أن تتوالى في سلسلة من الذرّات. فإن كانت منفصلة عن بعضها البعض بفاصل منتظم (يوافق ترابطاً بسيطاً)، وإن كانت واقعة في نفس المستوى، يمكن لإلكترونات كل سحابة أن تنساب **على طول السلسلة بواسطة مجموعة من "الأبدال"** "*relais*".

وإذا ما انغلقت السلسلة على نفسها في شكل حلقة (أَدِينين، بُرفيرين. . .)، فإن الإلكترونات تنتشر في **دارة مغلقة**. ينتج عن ذلك سحابة وحيدة، مائعة وشديدة التحرّك، تطفو من كل جانب من السطح الذي يكوّنه الجزيء المسطّح.





تسمّى الجزيئات التي تملك مثل هذا النظام من الأبدال الإلكترونية والذي يقوم على ترابطات متعدّدة **الجزيئات المترافقة** *conjuguées*. وتلعب هذه الجزيئات اليوم دوراً كبيراً جداً في تفاعلات الحياة.

وفي الواقع، يمكن تشبيه حركة الإلكترونات بتيار كهربائي ضعيف. **هذه الجزيئات المترافقة قادرة إذن على قيادة الطاقة أو المعلومات من بعد، دون أن تتغيّر بنيتها**، ويمكن للتفاعل بين مجموعتين وظيفيّتين، متباعدتين في الفضاء، أن ينطلق بوساطتها.

لقد لاحظ البرفسور پولمان B. Pullman من معهد البيولوجيا الفيزيائية الكيميائية بباريس أنّ الأغلبية الساحقة للجزيئات البيوكيميائية الأساسية مكوَّنة (كلياً أو جزئياً) من منظومات مترافقة. **فالحموض الأمينيّة والبروتينات والفسفات الغنيّ بالطاقة تملك جميعها** ـ بشكل من الأشكال ـ نظام قيادة إلكتروني. ويعتبر الكثير من **الأصبغة**

(الخضاب) والفيتامينات أيضاً جزيئات مترافقة. وكما لاحظ پولمان: «تنسجم السيولة الأساسية للحياة مع سيولة البنية الإلكترونية لمركّباتها». أما السّكر والشحوم، التي تمثل مدّخرات في شكل وقود، فإنها لا تكون مترافقة.

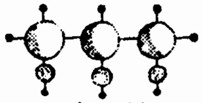
يمكننا القول إن هذه الجزيئات المترافقة تجسّد مقدّماً، حسب السلّم الجزيئي، قيادة الطاقة والمعلومة التي سيتم إنتاجها بمستويات عالية جداً من التشعّب، وذلك بواسطة الأنيبيبات *microtubules* أو اللُيَيْفات العصبيّة *fibrilles* الموجودة في الخلايا والأوعية والأعصاب في الكائنات العليا.

جزيئات تنعزل عن الماء:

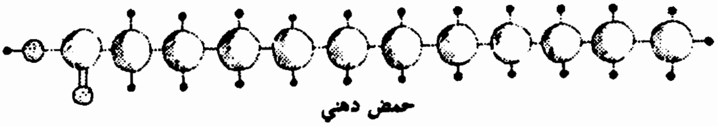
يلاحظ كل واحد منا أن بعض الأجسام تتعرض للبلل بسهولة، وأن بعضها الآخر لا يتبلل. فعندما نريد مثلاً أن نخلط الزيت بالماء، نحصل على قطيرات صغيرة تتجزّأ، ولكنها لا تختلط أبداً بشكل دقيق. تمتلك العديد من الأجسام العضويّة، كالزيوت والشحوم، مجموعات كيميائية ـ تكون حاملة عموماً لشحنات كهربائية ـ قادرة على جذب جزيئات الماء (مجموعات أليفة للماء) أو، بالعكس، على النفور منها (مجموعات كارهة للماء).

حتى أنه يمكن لبعض الجزيئات أن تملك في نفس الوقت (في مكانين مختلفين أو على سطوح متقابلة) مناطق أليفة للماء وأخرى كارهة للماء. وباتصالها بالماء، يكون لمثل هذه الجزيئات خصائص جد مميّزة.

لنأخذ حالة الأجسام الدهنيّة أو الزيوت (**الشحوم** *lipides*). يكون لهذه الجزيئات الطويلة "رأساً" أليفاً للماء يتكون من **الغليسيرول**. ترتبط بهذا "الرأس" سلاسل طويلة مكوّنة من العديد من ذرّات الكَرْبون (**الحموض الدُهْنِيّة**) التي تكوّن "الذيل" الكاره للماء للجزيء.

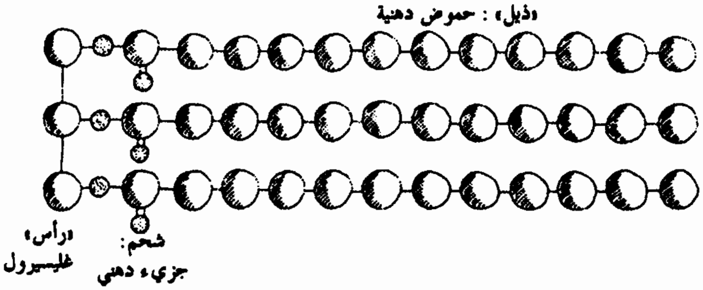


الغليسيرول

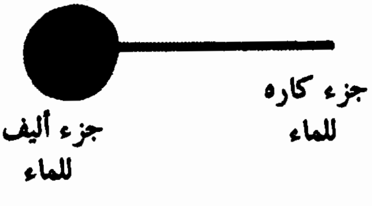


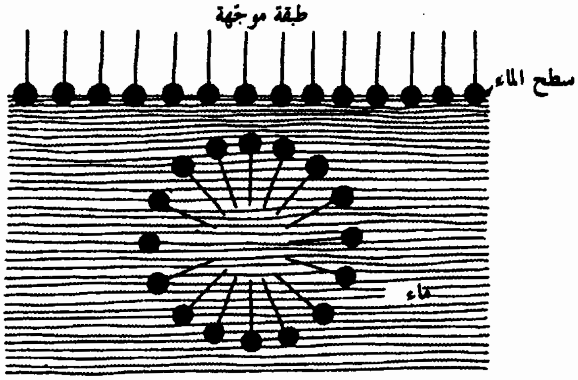
حمض دهني

في حالة وجود الماء، تتجه هذه الجزيئات الطويلة بطريقة يبقى فيها "رأسها" متصلاً بجزيئات الماء، فيما يبتعد عنها "ذيلها" قدر الإمكان. وبتقاربها الواحدة مقابل الأخرى، تكوّن هذه الجزيئات الدهنية طبقات رقيقة وموجَّهَة تفصل السائل إلى أطوار عديدة.



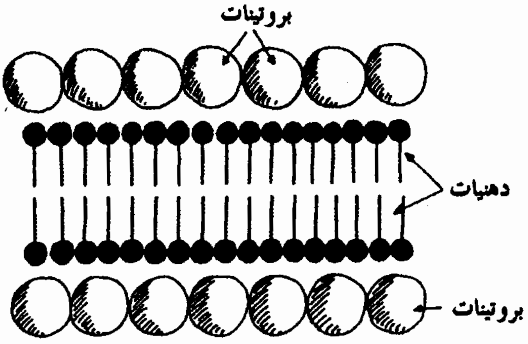
تمثيل تخطيطي





قطرة زيت في الماء

تستطيع بعض الجزيئات الضخمة، كالبروتينات، أن تتجمّع أيضاً مشكِّلة "أغشية" في شكل صُفاحات أو كُريّات، وأن تنعزل عن الماء. تحظى هذه البنى المنظَّمة بأهمية كبرى. من ذلك أن بنية الغشاء، الذي يفصل أية خليّة حيّة عن الوسط الخارجي، يكون



متماثلاً لدى جميع الكائنات الحية. ولذلك فإن أصل هذه البنية يعود إلى زمن بعيد جداً. تكون هذه البنية الكونية مكوّنة، كما يبيّن الرسم، من طبقة مزدوجة من الدهنيّات تحتوي في داخلها على البروتينات.

بنى تنظّم ذاتياً:

يمكن للجزيئات التي تجسّد سلفاً الآليّات الأساسية للحياة، كالتي سبق لنا استعراضها، أن تتجمّع في شكل هياكل أكثر تشعّباً، أي بنى حقيقية فوق جزيئيّة ـ مثلاً، في طبقات هيكلية رقيقة (طبقة لانغمير ـ بلودجات Langmuir - Blodgett في شكل خليّة نحل على سطح سائل مسخّن (ظاهرة بسنار Besnard) ـ وأن تنتظم أيضاً في الزمن في شكل مُوَلّد ذبذبات كيميائي، فتحدث دورة منتظمة كأنها ساعة توقيت جزيئية (تفاعل بلوزوف ـ زابوتينسكي Belouzouv - Zhabothinsky). ولكي يكون هذا التنظيم في الزمن ممكناً، من الضروري أن يخترق هذه البنى بصفة مستمرة كمٌ من الطاقة ـ ويُعتبر التنظيم الذاتي، كما بيّنه إ. بريغوجين I. Prigogine ومانفرد إيجن Manfred Eijen من معهد ماكس ـ بلانك بألمانيا، أحد نتائج "تبدّد" الطاقة في هذه الأجهزة المنفتحة على بيئتها. وهذا ما نسمّيه "البنى المبدِّدة".

قبل أن نضع مخططاً لشجرة "نَسَب" التطور السابق للبيولوجيا، لا بد لنا من إثارة سؤال جوهري: كيف يمكن لجزيئات بمثل هذا القدر الذي رأيناه من التعقيد ألا تتفكك تدريجياً خلال تكوّنها؟ ونحن نعلم في الواقع أن التفاعلات التي تقود إلى تكوين جزيئات ضخمة ومعقّدة هي دائماً عَكوسة: إذ بإمكانها أن تقود إلى التخليق مثلما يمكنها أن تقود إلى انحلال المادّة المتكوّنة.

من الناحية النظرية، كان من الممكن أن نتوقّع انهيار البِنى الكيميائية التي تتكوّن على الأرض أو في الحساء البدائي بنفس

السرعة التي تكوّنت بها. والحال أنّه لم يحصل شيء من هذا القبيل لأن تعقيد المادّة السابقة للبيولوجيا كان يتزايد باستمرار.

ومرّة أخرى، يظهر لنا أن العنصر الأساسي سيكون **الاستقرار الديناميكي** لهذه البنى. هذا الاستقرار هو نتيجة لظهور خصائص لا تتضح **إلا انطلاقاً من مستوى معيّن من التعقيد**. لننظر في بعض هذه الخصائص:

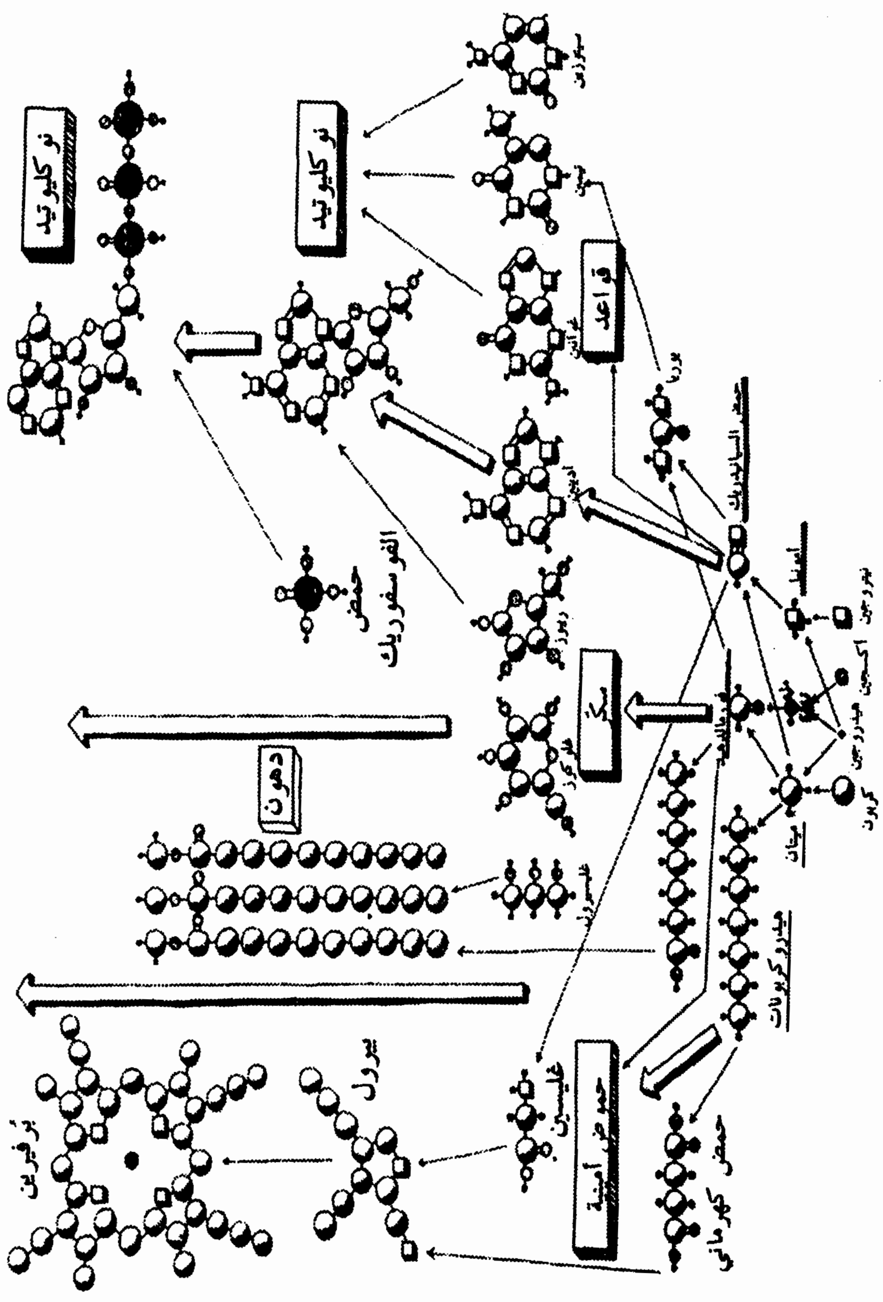
- إن الترابطات بين الجزيئات، أو داخل الجزيئات، التي تجبر مثلاً البروتينات على أن تلتف "كالنابض" (أو أن تنطوي في شكل كريّة)، تعمل على تثبيت البناء بأكمله في وضع مستقر.

- إذا كان هنالك جزيء معقّد قادر على تحفيز تخليق جزيء آخر ذي شكل مطابق تماماً، يمكن لعدد أفراد هذا النوع من الجزيئاتِ الخاصّة أن يرتفع إلى معدّل أسرع من ذلك الذي يطابق سرعة تهدّمها.

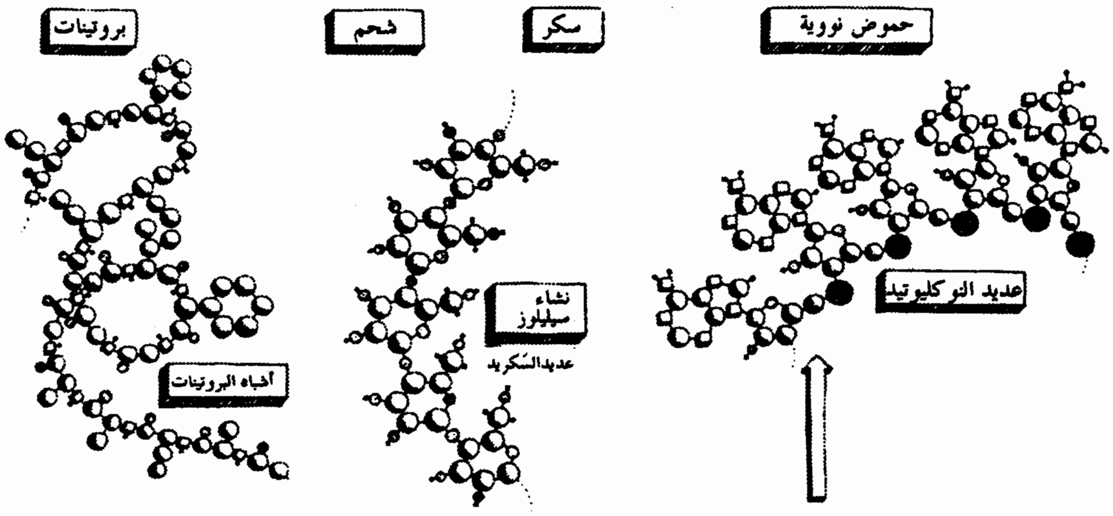
- إذا أُدرِجت تفاعلات التحفيز الذاتي أوالتحفيز المتسلسل في دورات وشبكات مترابطة بشدّة، فسوف تكتسب المجموعة استقراراً ديناميكياً كبيراً يفوق استقرار المواد المستقلّة.

يوفّر الترافق استقرار الجزيئات ويجعلها في نفس الوقت أكثر صلابة وأكثر تفاعلية. وكما لاحظنا بالنسبة إلى أولى المركّبات العضوية، يهب الاستقرارُ الديناميكيّ الجزيئات **احتمالاً أكبر للوجود**، وبالتالي **حظوظاً كبيرة جداً للتطوّر**. فالجزيئات الضخمة أو الجزيئات المترافقة تفرض نفسها، بالانتقاء الذاتي، على كامل بقيّة التطور.

في أواخر عام ١٩٧١، كان من الممكن إحصاء مثل هذه الخصائص ووضعها في معادلات على يد مانفرد إيجن، الأمر الذي فتح بذلك السبيل أمام الدّراسة الرياضية للتطور على المستوى الجزيئي.


نوكليوتيد
نوكليوتيد
قواعد
سكر
دهون
حموض أمينية
هيدروكربونات
ميثان
أمونيا
حمض الفوسفوريك
بيرول
بورفيرين
حمض كهرمائي

شجرة «نسب» جزيئات الحياة



بغية اختصار التفاعلات المتنوعة التي شرحت في هذا الفصل، ومن أجل حسن متابعة تشعّب الجزيئات العضوية المُتكوّنة في الجو وفي المحيط المائي البدائيّيْن، أمكننا أن نسعى إلى تكوين شجرة تطورية لهذه المرحلة الأولى في تاريخ الحياة.

ولقد تكوّنت هذه الشجرة بفضل التسلسل السابق للبيولوجيا الذي جرى إثباته في المختبر. وهي لا تدّعي إعطاء فهم دقيق، وبحسب الترتيب الزمني، لكل ما حدث فعلاً في بداية عمر الأرض. ولكنها تعطي مع ذلك لمحة عن المهمة التي ستتولى الكيمياء الحياتية التطورية إتمامها (بعض الذرّات ـ وبخاصّة ذرّات الهيدروجين ـ لم يتم تمثيلها تفادياً لاكتظاظ الرسم).

قطيرات غريبة ما قبل الحياة

يبدو أن المواد العضويّة المعقّدة، التي تتراكم على سطح الأرض وفي بحار الأرض البدائيّة، تتميّز بخصائص تجسّد مقدماً خصائص الحياة. ومع ذلك. . . . فإننا لازلنا بعيدين جداً عن الكائنات الحيّة الأولى. لنعطِ صورة عن ذلك: إن قطع غيار أول محرّك، موجودة فعلاً، لكن المحرك لن يبدأ بالدوران بمجرد تجميعها بشكل فوضوي داخل صندوق. وعلى نحو مماثل، سيكون من العبث التفكير بأن الجزيئات الضخمة كان بإمكانها أن تتحسّن، **الواحدة بمعزل عن الأخرى**، إلى أن تصير "حيّة". وكذلك الأمر، فإن تحسّن كل قطعة وكل عضو جزيئي من "المحرّك الخلوي" لم يكن ليُنتج من غير التطوّر البطيء **للمجموعة المتكاملة**، أي **للمنظومة**.

من بين المراحل التي كانت ضروريّة للتطور السابق للبيولوجيا يمكننا أن نذكر تكامل وتناسق ـ وسط قطيرات صغيرة جداً من المادة العضوية ـ تفاعلات كيميائية وجزيئات أساسية موجودة منذ تكوّن كوكبنا.

ذلك أنه في أثناء مرحلة تطوّر هذه القطيرات ماقبل الحيّة تم بلا شك اختيار الآليّات الأساسية للاستقلاب والرمز الجيني المشترك بين جميع الكائنات الحية.

لقد مكّنت فرضيات أ. أوپارين، انطلاقاً من حقيقتين، من تجاوز الهوة التي تفصل بين الجزيئات الضخمة لأولى الخلايا، وهي:

ـ إن الحياة ليست مشتتة في البيئة. فكل كائن حي هو فرد مستقل ومنفصل عن العالم الخارجي إمّا بغشاء أو بجلد.

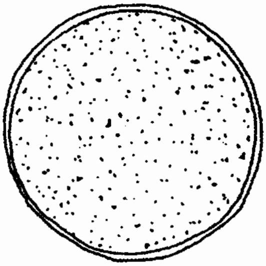
ـ إن التفاعلات الكيميائية التي كانت تتحقق في داخل "الحساء البدائي" كانت مشوّشة وفوضوية. والحال أن الحياة تقدّم منظومات متناسقة أو متزامنة من التفاعلات التي تتوالى وفق مراحل شديدة التنظيم في المكان وفي الزمان.

وفي نظر أوپارين، فإن ذلك يُعتبر الدليل على أن الخصائص المميّزة للحياة كان عليها أن تظهر تدريجياً في منظومات بسيطة جداً ومجهريّة، إلا أنها تامة، معزولة عن العالم الخارجي بغشاء واقٍ ومعرّضة على مر ملايين السنين لعملية الانتقاء الطبيعي. ونتيجة لذلك، تقوم **المنظومات** القادرة على الحفاظ الذاتي ـ وبالتالي على البقاء ـ **على انتقاء نفسها بنفسها**.

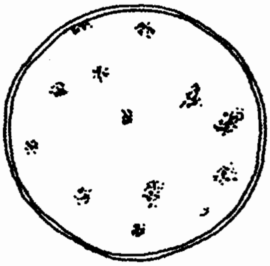
فيما يلي الكيفية التي نتصور بها اليوم التكوّن الطبيعي لهذه النماذج من الخلايا.

وسط "الحساء البدائي الساخن" الغني بالمواد العضوية، وفي الأماكن الغنية بالطين، تكون بعض الجزيئات قادرة على أن تكبر بسرعة تحت تأثير مصدر خارجي دائم من الطاقة ومن الحفازات المعدنية (أنظر ص ١٢٤). وعندما تبلغ حجماً كافياً، تكتسب الجزيئات الضخمة المحلولة خاصيّة التكدس إلى جانب بعضها البعض لتكوّن تجمّعات معقّدة يزيد حجمها عن حجم الجزيء

الضخم المعزول بمائتين إلى ألف مرّة. تسمّى هذه الظاهرة التقوصر *coacervation*. أمّا الأكوام المكدّسة فتسمى قوصرات *coacervats*.



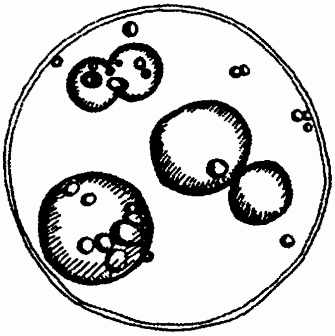
جزئيات ضخمة في محلول



تكوُّن القوصرات

ونحن نعرف هذه الظاهرة منذ زمن بعيد، ونعرف جيداً كيف نحققها في المختبر. لكن أوپارين هو من لفت أنظارنا إلى الأهمية الجديدة التي تتخذها في سياق أصل الحياة.

فبفضل التقوصر، تصبح جميع الجزيئات الضخمة، التي كانت قبلاً مشتّتة في الكتلة السائلة، مركّزة في نقاط محددة.



قطيرات من البروتينات المبيّهة
والمماثلة للقوصرات

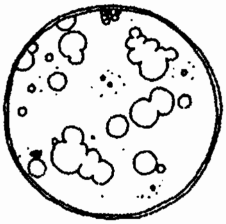
لكن من الممكن أيضاً، كما اقترح س. فوكس S. W. Fox، أن تكون الجزيئات العملاقة قد تكوّنت على سطح الأرض الساخنة

والجافة وليس بداخل "الحساء البدائي". وكان بالإمكان، بعد ذلك، أن تجرف مياه الأمطار هذه الجزيئات الضخمة وتنقلها إلى البحار حيث تتكوّم في شكل آلاف من الكريات المجوّفة والصغيرة التي يماثل حجمها حجم البكتيريا.

هل من الممكن الحصول على هذه القوصرات وهذه الكريّات في المختبر؟

إننا نحصل عليها بسهولة بحلّ أحد البروتينات (كالهلام والألبومين) أو الصمغ العربي في الماء. وإذا أضفنا إليه قليلاً من الحمض، سيتعكّر السائل، ثم تظهر آلاف القطيرات التي يمكن رؤيتها بالمجهر العادي: إنها القوصرات. ويعود تكوّنها، على الأرجح، لوجود شحنات كهربائية تحملها الجزيئات الضخمة(*). تجذب هذه الشحنات جزيئات الماء. وتكوّن هذه الجزيئات بدورها "قشرة" قادرة على عزل الأكوام عن الوسط.

ينحصر حجم القوصرات بين قوصرات أصغرِ الخلايا المعروفة وأكبرها، أي إنه يتراوح بين ميكرونين ونصف المليمتر تقريباً.



قوصرات نشاهدها بالمجهر

وفي نظر فوكس، إن حظوظ التكوّن العفوي للجزيئات العملاقة، مثل أشباه البروتينات، كان من المفترض أن تكون أكبر

(*) "جزيئات تنعزل عن الماء". تملك الجزيئات الضخمة للبروتين مجموعات أليفة الماء وأخرى كارهة له.

على الأرض الساخنة منها في البحار البدائية. ولتأكيد هذه الفرضية، فقد قام بتحضير أشباه البروتينات بتسخين مزيج من الحموض الأمينية، ولكنّ تجربته توغّلت بعيداً جداً.

أخذ فوكس خمسة عشر مليغراماً من أشباه البروتينات التي حصل عليها حديثاً ووضعها في حوالى ثلاثة مليلترات من الماء الساخن قليل الملح. وعند تبريد هذا المحلول، اكتشف **تكوّن عدد كبير من الكرات المستقلّة**. وقد قدّر فوكس عددها بحوالى ١٠٠ مليون إلى مليار من الوحدات المنفصلة، وهو عدد مهم بالنسبة إلى ١٥ مليغراماً فقط من المادة العضوية. هذه الكريّات الصغيرة سمّاها فوكس **الكرات المجهرية** *microsphères*.

لهذه الكرات الميكرويّة قطر يقارب الميكرونَين. ومن العجب بمكان أن حجمها ومظهرها يذكّران ببعض أنواع البكتيريا الكروية التي تُعرف باسم **المكوّرات** *cocci*. يمكن مشاهدة الكرات المجهرية بالمجهر العادي وبالمجهر الألكتروني. وقد لاحظ فوكس ومساعديه وجود "أغشية مزدوجة" فيها.

أما الاختلاف الأساسي ما بين قوصرات أوپارين وكرات فوكس المجهرية فهو أن القوصرات يتم الحصول عليها انطلاقاً من البروتينات البيولوجية في حين أن الكرات المجهرية تتكوّن من خلال أشباه البروتينات غير البيولوجية.

لقد سلّطت تجارب فوكس الأضواء على حدثين لم يكن أحد

يتوقعهما: قدرة أشباه البروتينات على **التنظيم الذاتي والسرعة** التي تمكّنها من التحول من الحموض الأمينية إلى أشباه البروتينات (بضع ساعات)، ثم من أشباه البروتينات إلى الكرات المجهرية (بضع دقائق). وكان من الممكن أن تتكوّن كميات هائلة من الكريات **حالما تكوّن كوكبنا** (من خلال كتلة من المادة العضوية أكثر أهمية من الخمسة عشر مليغراماً التي توفرت لفوكس!) وفي ظروف التطور الجيوكيميائي التي تغيّرت فيما بعد بشكل لا يمكن عكسه.

هذه الكريات هي بنى بيولوجية كاذبة: فهي تقدّم نوعاً من التشابه مع الخلايا الحية ولكنها تفتقر إلى الديناميكيّة الطاقيّة التي تميز الحياة. ونحن نميز عموماً بين النماذج التي تم الحصول عليها في المختبر (كرات مجهرية، قوصرات)، وبين الأنظمة الطبيعية البدائيّة *éobiontes* أو *protobiontes* التي سوف نسميها تبسيطاً **القطرات المجهرية** *microgouttes*.

تملك القطرات المجهرية حتى الآن خصائص تشبه خصائص الخلايا الحية.

- القطرات المجهريّة هي فرديّات منفصلة عن الوسط البيئي. فحتى ذلك الحين، كان تطوّر المادة العضوية ذائباً في تطوّر الوسط البدائي. ومع القطرات المجهرية ظهرت، ولأول مرة، **وحدات إفرادية**.

- هنالك تكوّنٌ **لوسط داخلي**. ومنذ ذلك الحين فصاعداً، سوف تتكاثر التفاعلات الكيميائية الموزّعة في كامل السائل بين **مكانين مختلفين**: داخل القطرات المجهرية والبيئة.

- تحصل تبادلات انتقائيّة للمواد خلال الغشاء الرديمي.

- تعتبر البنية الكيميائية الداخلية لكل قطرة مجهريّة عملية خاصة بها.

- نتيجة لذلك، يمكن أن يكون لكل قطرة مجهرية، على مر

الوقت، مصير يختلف عن مصير الأخريات. وهكذا يمكن لكل نظام أن يدوم أو يتطوّر أو يختفي.

من القطرات المجهرية إلى أسلاف الخلايا

استناداً إلى نظريّة أوپارين، يمكننا أن نعتبر أن هناك خمس مراحل(*) متتالية لتحوّل القطرات المجهرية إلى كائنات بدائيّة. يحدث الانتقاء الأول بلا شك بين القطرات الأكثر استقراراً والقادرة بالتالي على الصمود طويلاً، وبين القطرات الأخرى سريعة الزوال التي تختفي بسرعة. تنحل بعض المنظومات ولا تلعب أي دور خلال بقية التطور، أما بعضها الآخر، فتحافظ بمرور الزمن على صلابة غشائها وعلى استقرار تركيبتها الداخلية.

تتميّز كرات فوكس المجهرية باستقرارها الشديد. ويمكننا تسخينها وإخضاعها للطرد المركزي وتقطيعها إلى صفاحات رقيقة. وهي تحافظ على شكلها خلال أسابيع وبدون شك إلى ما لا نهاية. إضافة إلى ذلك، تختلف تفاعلات الكرات المجهرية باختلاف الظروف الفيزيائية والكيميائية للوسط. فعندما نحرّكها، تتجزأ إلى قطرات صغيرة جداً مثل الزيت المُستَحلب في الماء. يمكننا إذن أن نشارك أوپارين في تفكيره بأنه، تحت تأثير أسباب خارجية مثل الريح وأمواج المحيطات أو أي نوع من الاحتكاك، يرتفع عدد القطرات المجهرية السكونية، ولكن المستقرة، بدون انقطاع.

ومع ذلك فإن هذا الاستقرار لن يدوم طويلاً. وبالفعل فإن المواد الكيميائية تعبر الغشاء وتتفاعل بداخل القطرة المجهرية مغيّرةً تركيبتها الداخلية.

من المحتمل أنّ "الحساء البدائي الساخن" كان غنياً جداً

(*) لا تزال هذه المراحل افتراضية. ولكنها مع ذلك تجسّد قاعدة عمل صلبة وجدت العديد من الإثباتات التجريبية.

بالجزيئات العضوية والقريبة من تلك التي تساهم حتى في شكل القطيرات. وبعض الجزيئات الصغيرة، مثل الماء أو الغلوكوز أو الحموض الأمينية، تعبر الغشاء بسهولة، أما بعضها الآخر فإنه لا يخترق القطرة حتى ولو كان تركيزه خارجها شديداً. وهكذا تُنشّط تفاعلات التبادل الكيميائي والانتشار والتناضح الخاصة بالخلايا الحية، والتي تجسّد مقدماً غذاء الكائنات الأكثر تطوراً. ولذلك يمكن أن نعتبر القطرات المجهريّة على أنها **أولى الكائنات غيرية التغذية**.

ماذا ستكون نتائج اختراق المواد الكيميائية هذه للقطرة؟

بسبب التركّز القوي جداً للمتفاعلات، فإن بعض التفاعلات ـ التي لا تحدث أو تحدث ببطء شديد في الوسط المحيط ـ سوف تنشأ بسهولة أكبر بداخل القطرة. ويمكن أن تتراكم مواد جديدة أو أن تُلفظ خارجاً. كما أن بعض التفاعلات سوف تقوم بتحرير الطاقة، وبذلك يبدأ إطلاق أولى حلقات الاستقلاب الرديمي تدريجياً.

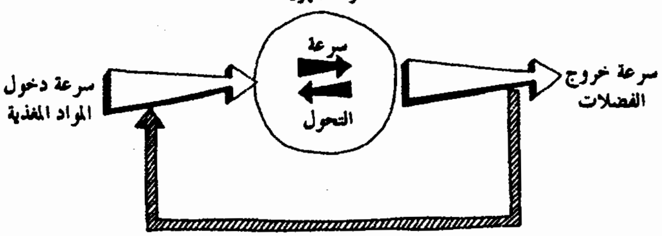
لكن هذه التحولات لها تأثير عميق على المصير الفردي لكل قطرة.

وفي الواقع، يمكن أن تكون بنية وتركيبة كل منظومة مغايرتين قليلاً لبنية وتركيبة المنظومة المجاورة لها. فقد تحتوي بعض القطرات المجهرية على أيونات معدنية باستطاعتها تحفيز بعض التفاعلات، بينما يكون للبعض الآخر تركيزاً أكثر قوة بنوع معين من الجزيئات. هكذا، تنشأ علاقة حميمة ما بين **التنظيم الداخلي** للقطرة المجهرية المعطاة وبين **طبيعة** التغير الكيميائي الحاصل. كذلك يمكن لتفاعلات قوية جداً أن **تتلف** القطرات المجهرية فيما ييسّر البعض الآخر استقرارها الحيوي، ومن ثم فرص وجودها.

وحدها القطرات المجهرية التي تملك تفاعلات كيميائية داخلية وتنظيماً جزيئياً **تيسّر مجتمعةً صمودها** يمكنها أن تكتسب ـ في الظروف التي تحكم الوسط البدائي ـ **وجوداً طويلاً إلى حد ما**. هكذا

نفهم كيف تم تدريجياً اختيار التطورات الأساسية التي تسمح اليوم لجميع الكائنات بأن تبقى على قيد الحياة.

عبر تبادل دائم للمادة والطاقة مع البيئة، تثبِّت القطرات المجهرية وجودها **كمنظومات مفتوحة** هي التي تميّز الكائنات الحية.



تغذية راجعة

وهناك بصفة دائمة تيّار من المادّة والطاقة الآتية من الخارج يعبر جميع الكائنات الحية، وبفضله تحافظ هذه الكائنات على بقائها: إنها خاصّية الحفظ الذاتي. تسمى مثل هذه الكائنات **منظومات مفتوحة**. وهذه النظرية شديدة الأهمية. ويمكن أيضاً اعتبار الأرض والمحيطات البدائية **منظومات مفتوحة** يمكن للجزيئات المعقّدة (وبالتالي **غير المحتملة** بالنسبة إلى الديناميكا الحرارية الكلاسيكية) أن تتراكم بداخلها وتتواصل وتزداد تعقيداً. إنها ديناميكا حرارية جديدة تُعرف بالتطورات اللاعكوسة *processus irreversible*، ديناميكا كان إيليا بريغوجين من واضعيها، وكانت تطبّق على هذه التفاعلات التي تحدث بعيداً عن حالة التوازن.

في المنظومات البدائية المفتوحة ـ التي كانت قبلاً تميّز الحياة ـ المتمثلة بالقطرات المجهرية، يتسبب كل من دخول المواد الغنية بالطاقة المتأتّية من الخارج وخروج المركبات المتكونة من الداخل إلى خلق **سيل متواصل**. يعوّض هذا السيل باستمرار ـ من طريق جلب الطاقة "النَدِيّة" ـ عن الطاقة "المستعملة" من قبل المنظومة.

وبطريقة أكثر تقنيّة ، يمكننا القول إنه بفضل الأنتروبيا السلبية الناتجة من "الأطعمة"، تبقى الأنتروبيا الداخليّة للمنظومات المفتوحة في مستوى منخفض نسبياً، وذلك برغم التزايد اللاعكوس لأنتروبيا الوسط. يمكن لهذه المنظومات أن **تخفّض الأنتروبيا محلياً**، وحتى أن تتطور نحو حالات ذات مستوى مرتفع جداً من التعقيد.

وبخلاف الأنظمة المعزولة حيث تتحدد الظروف النهائية بحسب **الظروف الأوليّة**، هنالك أنظمة مفتوحة متشابهة يمكنها أن تصل إلى حالة نهائية انطلاقاً من **الظروف الأولية المختلفة** وبطرق مختلفة أيضاً. تتّجه هذه المنظومات، فيما يبدو، إلى "غائية" finalité تحافظ على بنيتها الذاتية، وبالتالي على وجودها.

أما المنظومات **المستقرة** بالتنظيم الذاتي، فإنها تكون أكثر حظاً من غيرها، خلال التطور السابق للبيولوجيا، لكي تكون محفوظة بالانتقاء الطبيعي.

لقد نجح علماء البيوكيمياء في المختبر بتحريض آليات حيوية للحفظ الذاتي داخل منظومات بسيطة جداً مثل الكرات المجهرية والقوصرات.

فقد أثبت أوبارين مثلاً أنه إذا أدخلنا حفّازاً (يسرّع عادة تحول الغلوكوز إلى نشا) بداخل قوصرة، فإنّ الغلوكوز ـ فسفات الموضوع في الوسط الخارجي، "يُضخّ" بسرعة داخل القطرة في حين يتراكم النشا في الداخل.

وإذا أقحمنا بعد ذلك في القطرة حفّازاً يدمّر سلسلة النشا، سنعثر في الوسط المحيط على **المالتوز**، ذلك المُنتج المألوف المرافق لتفكك النشا.

وإذا تواجد الحفّازان معاً في نسب ملائمة، يمكن للنشا أن يتكوّن وأن يتفكك بالسرعة ذاتها: تكون المنظومة المفتوحة المتكونة في حالة **توازن ديناميكي**. أما إذا كان هناك فائض من الحفّاز الأول،

يتراكم النشا وتتضخم القطرة أكثر فأكثر. وإذا كان هناك فائض في الثاني يتفكك النشا وتتلاشى القطرة بسرعة.

بالاستناد إلى نظريات پريغوجين، الخاصة بالديناميكا الحرارية للمنظومات اللاعكوسة، قام البروفسور ر. بوفي R. Buvet، من مختبر الكيمياء العامّة للمدرسة العليا للفيزياء والكيمياء الصناعيّة بمدينة باريس، بحث تفاعلات استقلاب العناصر في القوصرات. واستنتج أنّ تفاعلات النقل والتحوّل ما بين القوصرة ووسطها تؤدي بمجرد توازن التبادل، إلى تغيرات كهركيميائية في كل الوسط المحيط، ويتكوّن بالتالي استقلاب بدائي.

يمكن أن يحدث في المنظومات المفتوحة تراكم داخلي للمادة الكيميائية. وسيكون بإمكان القطرة، إذن، أن تكبر وتتجزّأ ـ هذه المرة **لأسباب داخلية** ـ إلى قطيرات صغيرة جداً. وسوف لن تكون لكل القطرات المتكوّنة حديثاً نفس التركيبة الكيميائية بالضرورة ولا نفس البنية. ففي بعض القطرات يمكن للحفّازات الملائمة لنمو القطرة المجهريّة والمحافظة عليها، أن تتواجد بالنسب "الجيدة". أما البعض الآخر فيرث مركّبات غير ملائمة تؤدي إلى هدمه. وهكذا، لا تحفظ سوى القطرات المجهرية الأكثر تطوراً والتي يستمر عددها في التزايد.

يجب تقديم تطوّر هذه الكائنات غيريّة التغذية والبدائية على أنها باقة من التطورات الفردية. وليس لهذه المنظومات البسيطة إلى الآن تواصل جيني، وهي لا تكوّن سلالات مثل الأنواع الحيوانية. ومع ذلك، ففي جمهرة من القطرات المجهرية ـ التي تتطور في وسط يحتوي على كمية محدودة من المواد المغذية ـ ينشأ نوع من المنافسة. صحيح أنها منافسة سلبية، ولكنها منافسة في حدّ ذاتها، لأن بعض المنظومات تصمد والبعض الآخر يختفي إلى الأبد. إنها نفس المبادئ الأساسية للانتقاء الطبيعي التي بيّنها داروين.

عندما يكون العديد من الأنواع الحيوانيّة في حالة تنافس، يكون أكثرها تميّزاً (أي بالتالي أكثرها حظوظاً لكي تُحفظ بالانتقاء الطبيعي) هو الذي يملك أطول مدة للبقاء ومعدلاً سريعاً للتكاثر، وإمكانية للقضاء على باقي الأفراد المنافسين.

في مستوى رديمي للغاية، توجد هذه الخصائص في جمهرة من القطرات المجهرية قيد التطوّر. إنها " الصراع من أجل الحياة"، قبل الحياة...

- ٣ -

ظهور الكائنات الحيّة

في المحيطات الأصلية يتواصل نمو مجموعات القطرات المجهرية وانقسامها. وقد سبق وأن نُشِّطت السلاسل الأولى للاستقلاب الرديمي. وشيئاً فشيئاً، تُرسم ثم تُعيّن الوظائف الكبرى **للحفظ الذاتي والتكاثر الذاتي والتنظيم الذاتي** باعتبارها علامة للحياة.

ولكي نفهم المراحل الكبرى لهذا التطور بشكل أفضل - والتي تدوم تقريباً من مليار إلى مليارين من السنين بعد تكوّن كوكبنا - يجب أن نميز بين ثلاثة أقسام رئيسية(*).

سيكون للمرحلة الأولى مميزاتها في الطاقة. فهي تمكّن من معرفة كيف استطاعت الكائنات البدائية أن تسيطر على التطورات الأساسية للطاقة وتتحكّم بها: التخمّر والتخليق الضوئي والتنفّس(**).

تتعلق المرحلة الثانية بسرعة التفاعلات الكيميائية الداخلية وتنظيمها. كما تُبرز الدور الأساسي للأنزيمات.

أخيراً، تصف المرحلة الأخيرة "تكفّل" "إدارة" نموذجية بمجموعة هذه التطورات: إدارة الحموض النووية. كما تبيّن طريقة تحسين الآليات التي سمحت للحياة بأن تنتشر وتتطوّر.

وشيئاً فشيئاً، تفسح القطرات المجهرية المكان للكائنات

(*) هذا التقسيم غايته تسهيل الشرح. فهو لا يوافق تسلسلاً زمنياً حقيقياً، إذ إن هذا التسلسل لا يزال فرضياً.

(**) هذه التطوّرات سبق وصفها في فصل" كيف تعمل الخليّة؟" (راجع ص ٤٩) لذا لا نهتم هنا سوى بنظام ظهورها والتغيّرات التي نتجت عنها في الوسط.

البدائية، الأكثر تطوّراً والتي تمثّل الأسلاف الأوّلى للبكتيريا والطحالب.

إطلاق الوظائف الحيويّة الكبرى

عندما تكتمل أولاً بأول كافة البنى والتنظيم الداخلي والخارجي للقطرات المجهرية، تصبح كمّية الطاقة "النَدِيّة" المُخصّصة للحفاظ على نظام المجموعة ضروريّة أكثر فأكثر. تتمثل هذه الطاقة بمواد عضوية ذائبة في المحيطات البدائية. تنفذ هذه المواد بشكل متواصل في الوسط الداخلي للقطرات المجهرية. وهنالك تتحول كيميائياً مُطلِقةً الطاقة التي تحبسها. وعلى العموم، فإن هذه التفاعلات تحدث بالصدفة نتيجة لصدمة بين جُزيئين. وكلما ارتفعت درجة الحرارة، زاد تحرك الجزيئات وتدافعها وأصبحت بالتالي فرص الصدمة الفعّالة وفيرة. ومع ذلك يخشى من الآن فصاعداً أن يؤدي ارتفاع شديد جداً في درجة الحرارة (يسهّل بعض التفاعلات على سطح الأرض الحارّة أو بالقرب من البراكين) إلى تقويض الأبنية الجزيئية الهشّة مثل القطرات المجهرية. وينبغي بالتالي أن تكون **طاقة التنشيط**، القادرة على تشجيع التفاعلات الحيويّة الأولى، واقعة في مستوى وسطي. والحال أن **المنشطّات الكيميائية** (مثل ثُلاثِي فُسفاتِ الأَدِينُوزين ATP) أو **الحفّازات**، بإمكانها تخفيض طاقة التنشيط هذه والسماح لهذه التفاعلات بأن تحدث على درجة حرارة معتدلة جداً، تنسجم مع الحفاظ على الكائنات الأولى.

لم يكن بالإمكان تنشيط سياقات الحفظ الذاتي، وهي التداخلات الأولى لآليات الاستقلاب، إلا بالاعتماد على هذه المنشطات. وسوف نجد جزيئين أساسيين، الغلوكوز وثُلاثِي فُسفاتِ الأَدِينُوزين، بنسبة قد تكون كبيرة في الوسط الذي نمت فيه الكائنات الأولى غيرية التغذي.

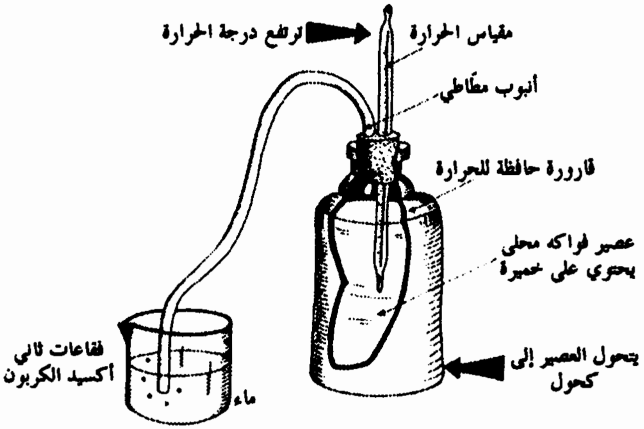
يُعتبر جزيء الغلوكوز نقطة البداية. فهذا الجزيء وحده لا يكون فعالاً بما فيه الكفاية لإثارة أي نوع من التفاعلات: لذا يجب أن يُنشّط بواسطة ثُلاثِي فُسْفاتِ الأَدِينُوزِين الذي يحوله إلى **غلوكوز - فسفات**.

في هذا السياق، يكون ثُلاثِي فُسْفاتِ الأَدِينُوزِين الشديد القيمة قد **أطلق طاقته**؛ فقد "أفرغ حمله" وأصبح الآن في شكل ثُنائِيُّ فسفات الأدينوزين (انظر ص ٥٦). فكيف له أن يُشحن ثانية؟ سيكون هذا دور **التخمير**، وهو احتراق بطيء للغلوكوز في غياب الأكسجين. هذا التفاعل، الذي بفضله يُصنع الخمر أو البيرة أو السَيْدر، كان معروفاً مذ زمن بعيد، غير أنّ اختصاصيّي الكيمياء الحيوية الأوائل، والذين سبقت لهم دراسة هذا التفاعل، لم يخطر ببالهم بدون شك أن هذا الأخير يمكن أن يكون واحداً من التفاعلات الأولية الطاقية والحيوية. في أثناء هذا التفاعل، يتحوّل سكر عصير الفواكه إلى **كحول** مولداً **الحرارة** ومُطلقاً **ثاني أكسيد الكربون** (راجع التفاصيل في الملحق رقم ٣).

تقودنا مراقبة سياق تفاعل التخمير إلى ملحوظتين رئيسيتين:

يمكن أن يحصل التخمير **خارج أي كائن حي**، في محلول بسيط يحتوي على الأنزيمات الأحد عشر التي تحفّز المراحل المتتالية من تردّي جزيء الغلوكوز. إذن، هنالك احتمال قوي بأنّ يكون هذا التفاعل المُطلِق للطاقة قد وُجد قبل الحياة سواء في الوسط البدائي أو ربما في القطرات المجهرية غيريّة التغذية للمحيطات القديمة. هذا ولن تتمكن الحفّازات النوعيّة من تسريع كل مرحلة إلا بشكل تدريجي، متيحة للتفاعل في جملته أن يحدث في وقت قصير جداً.

يعتبر التخمير مماثلاً لعملية **تحلّل الغلوكوز** ***glycolyse***، وهي المرحلة الأولى للتنفّس (انظر ص ٦٧) التي في غضونها يكون الغلوكوز قد تحوّل إلى قطعتين تحمل كل واحدة منهما ثلاث ذرات



من الكربون. يحدث تحلّل الغلوكوز والتخمير في غياب **الأكسجين**. وبذلك يمكننا التفكير في أن التخمير قد بدأ في وقت لا وُجود فيه بعدُ للأكسجين الجزيئي على الأرض أو في المحيطات. أما التنفّس، الأحدث، فقد أتى لكي يُلحق بآليّات سبق وجودها.

تتكوّم فضلات التخمير (كحول، حمض لاكتيك، ثاني أكسيد الكربون) في الوسط. ويكون بعضها ساماً في حين يحتوي البعض الآخر على جزء لا يزال هاماً من الطاقة غير المُستعمَلة. هذا التغيير في الوسط سيكون له نتائج ذات شأن. كما أن اختيار وتكيّف الكائنات البدائيّة سيؤدي تدريجياً إلى التخليق الضوئي والتنفس.

لكن مثل هذا النوع من التفاعلات المُنتجة للطاقة لا بد أن يكون مضبوطاً. في الخليّة، ستلعب الأنزيمات هذا الدور. فكيف تم اختيار الحفّازات الكيميائية الحيوية شيئاً فشيئاً في أثناء التطوّر السابق للبيولوجيا؟

يمكن مقارنة مختلف الأنزيمات الفاعلة في كل مرحلة بالعمال الذين يتعاطون صناعة جزيء هام على سلاسل تركيب عديدة ومُدمجة في الشبكة. فكل عامل يتولى القيام بعمل محدد: فهو من جهة يجمّع

الأجزاء التي تصل إليه، ويمررها من جهة أخرى إلى العامل التالي. نتبيّن إذن أن **سرعة العمل** ليست وحدها الضرورية، ولكن أيضا **تزامن** هذه السرعة مع سرعة جميع العمّال الآخرين في السلسلة ذاتها. وليس هذا كل شيء: إذ يجب على سرعة التجميع في سلسلة التركيب أيضاً أن تتزامن مع سرعة التجميع في **جميع السلاسل المتوازية الأخرى**. وفي الواقع، فإنه إذا لم يعمل أيّ من العمال بما يكفي من السرعة، فسيؤخر كامل السلسلة. أما إذا كانت السلسلة سريعة جداً، فلا يمكن أن تُعالج المادة شبه الناجزة بنفس الوتيرة بواسطة السلاسل الأخرى. وسوف يتراكم العمل، وسوف يحدث اختناق في السلسلة.

هذه الصورة يمكن نقلها في الخلية إلى المستوى الجزيئي. هناك، تحدث آلاف التفاعلات في نفس الوقت، بدون تأخير ولا اختناق.

ويتمثّل دور الأنزيمات في تسريع ومزامنة وضبط مجموع هذه التفاعلات.

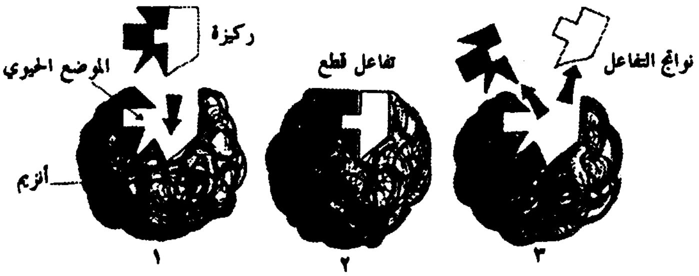
يتمثّل المركز الوظيفي للأنزيم، حيث تحدث التفاعلات الكيميائية، **بالموضع الحيوي**. في هذا المكان الخاص في "جسم" الأنزيم، يُحتفظ بالكواشف في مكانها على مدى لا بأس به من "الأدوات الكيميائية" للموضع الحيوي. وهذا ما يسمح للتحوّل بأن يحدث بسرعة كبيرة، بواسطة تفاعل جواري بسيط بين مجموعتين وظيفيتين (بدلاً من أن يحدث بواسطة صدمة غير منتظمة) وبدون استهلاك كبير لطاقة التنشيط.

غير أن الأنزيمات شديدة التخصص. إذ لا "يجيد" كل واحد منها عموماً تحفيز غير نوع واحد من التفاعلات. فماذا يفعل إذن لكي "يتعرّف" إلى الجزيئات التي اعتاد تحويلها و"يفرزها"؟

لقد أقمنا الدليل مؤخراً على أنّ الأنزيمات **وركائزها** *substrat*

(الجزيئات التي تعمل فوقها) "تتواصل" بتبادل المعلومة في إطار نوع من اللغة الجزيئية". وما من داعم لهذه اللغة البدائيّة غير **الشكل** الهندسي للجزيئات. "تتعرّف" الأنزيمات إلى المعلومات التي تعنيها، لأنها تحمل منها "الذاكرة" المُسجّلة في موضعها الحيوي. يكوّن القفل أيضاً نوعاً من "الذاكرة" التي تحفَظ "في شكل تجويف" شكل المفتاح. ويكون لأنزيم خاص أيضاً "شكل تجويف"، في البنية الكيميائية للموضع الحيوي، هو شكل الجزيئات التي يؤثر عليها: **فيكون الاثنان متمِّمين واحدهما للآخر**.

وعلى سبيل المثال، يوضح الرسم أدناه كيفية عمل الأنزيم.



تعثر الركيزة على مكانها المتمّم عند الموضع الحيوي (١). يتحقّق تفاعل القطع في وقت قصير جداً (٢). تترك الجزيئات الجديدة الموضع الحيوي، ويكون الأنزيم المُطلَق على استعداد للتحرّك من جديد (٣) (يمكن أن يحدث نفس التفاعل بالعكس).

ما أن يصبح الجزيء مفصولاً عن الموضع الحيوي، حتى يكون الأنزيم غير المتغيّر ـ مثل أي حفّاز ـ على استعداد للتحرك من جديد. وإذا كان الموضع الحيوي مشوشاً، يصبح الأنزيم غير فعّال، فلا "يتعرف" أبداً إلى ركيزته؛ في المقابل، يمكن للأنزيم السليم أن يحفّز في أنبوب اختبار، إلى ما لا نهاية، تفاعلاً كيميائياً يماثل ذلك الذي يحدث داخل الكائن.

تملك أغلب الأنزيمات **عدة مواضع** يمكنها أن ترتبط بجزيئات مختلفة الأشكال. تلعب الجزيئات دور **منشّطات** أو **مثبطات** للموضع الحيوي بحدّ ذاته. وتحت تأثير الجزيئات ـ التي تعمل كإشارات ـ أو تحت تأثير "الاستثارات" المختلفة (إلكترونات أو فوتونات) المُضخّمة بالترافق الإلكتروني، **تغيّر الأنزيمات ميكانيكياً تشكيلتها الحيّزية**: فهي تتقلّص أو يتغيّر شكلها وخصائصها الكيميائية(*). بذلك يتلقّى الأنزيم ويدمج العديد من المعلومات في الوقت نفسه. كما أنه لا يعمل مثل قاطع التيار الذي ليس له غير وضعين اثنين: مفتوح أو مغلق. "يستجيب" الأنزيم، بطريقة ليّنة، لتغيّرات محيطه مُعدِّلاً نشاطه(**).

بذلك تكون الأنزيمات قادرة على تذكّر المعلومات، وعلى تغيير بناها ميكانيكياً نسبةً إلى المعلومات التي تتلقاها، أو إرجاع المعلومات المتغيّرة. ويمكن مقارنة هذه الأنزيمات بحواسيب مجهريّة بيولوجية. لكن كيف تم إنتقاء هؤلاء الآليّين الجزيئيّين الذين نتجوا عن تطوّر بطيء؟

استناداً إلى خصائص التنظيم الذاتي لأشباه البروتينات وآليّات انتقاء القطرات المجهرية، يمكننا أن نضع رسماً شاملاً. ومرّة أخرى، سيكون العامل المُحدِّد هو **سرعة التفاعلات**.

تتحوّل المركّبات الكيميائية التي تشارك في تفاعلات متوازية، في نفس المنظومة، إلى الاتجاه الذي تستطيع فيه أن **تتفاعل بأكبر سرعة ممكنة**. وهناك في الواقع، اختلاف شاسع بين اثنين من التفاعلات من نفس الطبيعة، مع أن أحدهما يحدث في بعض أجزاء

(*) تسمّى مثل هذه الأنزيمات تفارغيّة *allostérique*. نظريّة التفارغ التي طرحها الدكتور ج. مونو بمعهد باستور، جرى تجريبها في السابق بنجاح

(**) ندرك الآن كيف يمكن لجهاز التنظيم الكيميائي أن يعمل (كابت ـ مشغّل) وهو ما سبق لنا الحديث عنه في ص ٩٧.

من الألف من الثانية والثاني في عشر سنوات! ولدى الكائن الحي أو الذي يسبق الحياة ، لا يلعب التفاعل البطيء أي دور في الاستقلاب. ولهذه القاعدة الأساسية تأثير خاص على كامل المنظومة. في وسط مغلق حيث يتعايش عدد لا يُحصى من الكائنات البدائية في تنافس سلبي، سيعبر سيلان المادة والطاقة الأكثر أهمّية المنظومة الأكثر حيوية، أي تلك التي تحظى **بسرعة كبيرة جداً في التحوّل الكيميائي الداخلي**.

وإذا كانت حيوية هذه المنظومات متوافقة مع الحفاظ الذاتي الخاص بها، ستجتذب آنذاك لصالحها كمية هائلة من المواد العضوية المُغذِّية و"المُجوّعة" تماماً "للمنافسين" أصحاب الاستقلاب البطيء جداً. لكن لا يلبث أن يلحق **الإقصاء** هؤلاء المنافسين. وحدها الكائنات الأكثر حيويّة، والتي **تملك حفّازات أكثر فاعلية**، هي التي تُحفظ عن طريق الانتقاء الطبيعي.

مصدر الرمز الجيني

من بين عشرات الآلاف من الكائنات البدائية قيد التطوّر - *proto organismes*، تفرض الكائنات الأولى، والقادرة على التكاثر بإعطاء نسختين طبق الأصل منها، تنظيمها نهائياً على كامل التطور التالي للحياة. وهذه الكائنات تسحق بتأثير عددها الكبير الكائنات الأخرى الأقل تطوراً وغير القادرة على التكاثر.

إن أول سؤال يجب أن نطرحه على أنفسنا هو التالي: هل تستطيع الآليات المبهرة المرافقة لتضاعف حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك ولتسجيل الرمز الجيني وتخليق البروتينات أن تظهر **خارج الكائنات الحيّة**؟ مثل هذا السؤال جوهري: فإن كانت الإجابة سلبية لأن هذه العمليات تعتمد على "مبدأ حيوي"، فمن غير الجدوى أن نبحث في كيفية تمكُن هذه الآليات من الظهور للمرة

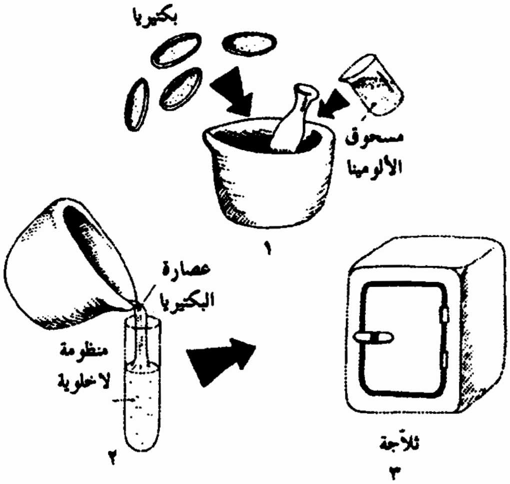
الأولى في غياب الحياة. وسيبقى مصدر هذه العمليات لغزاً على الدوام. بخلاف ذلك، إن كانت الإجابة إيجابية، سيكون المجال الذي سيُفتح أمام الملاحظة والتجربة شاسعاً.

لقد أثبتت بعض التجارب التي غدت تاريخية فيما بعد أنّ بإمكان هذه العمليات أن تُصنع في المختبر.

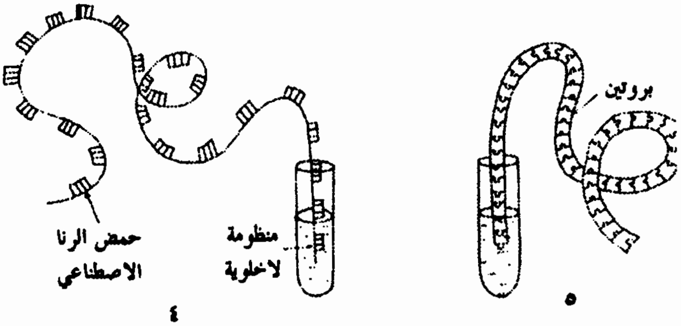
بدأت هذه السلسلة المتميّزة من التجارب سنة ١٩٥٧ بالتجربة المشهورة التي أجراها أ. ل كورنبرغ A. L. Korenberg، الحائز على جائزة نوبل في الطب سنة ١٩٥٩ (كان يومها بجامعة واشنطن، في سان لويس). حقّق كورنبرغ، في أنبوب اختبار، التنسّخ الذاتي *autoreplication* لحَمْض الديوكسي ريبونوكلييك، انطلاقاً من مكوّناته الكيميائية، وأحد الأنزيمات وكمّية قليلة من هذا الحمض الأخير استعملت "لتنشيط" التفاعل. ولتوضيح هذه الطريقة التجريبية، الخاصة بالبيولوجيا الجزيئية، نورد بواسطة بعض الرسوم تجربتين متشابهتين: تجربة م. و. نيرنبرغ M. W. Niremberg (١٩٦١) من المعهد القومي للصحّة (الولايات المتحدة الأمريكيّة)، التي مكّنت من حل الرمز الجيني، وتجربة س. سبيغلمان S. Spiegelman (١٩٦٥) من جامعة إيلينوي، التي يمكن اعتبارها أساس الاكتشافات التي اهتمّت بالفيروسات ذات حَمْض الريبونوكلييك ودورها في بعض حالات السرطان (انظر الرسوم على الصفحات التالية).

تُدقّ بعض خلايا العَضَوِيَّة القولونِيَّة بمهارة وعناية في هاون مع مسحوق الألومينا (١). توضع "العصارة" المُكوَّنة في أنبوب اختبار (٢). تُسمّى هذه "العصارة" منظومة لاخلوية (منظومة خالية من الخلايا). وهي تحتوي على جميع المقوّمات الضرورية لصنع البروتين(*). وبما إنها مُقوّاة بالمواد الغنية بالطاقة، فهي تربط بعض الحموض الأمينيّة بأحد البروتينات. لكن يمكن إيقاف هذا

(*) وهي: حَمْضُ الديوكسي ريبونوكلييك، حَمْضُ الريبونوكلييك، حَمْضُ الريبونوكلييك الخاص بالنقل، الحموض الأمينية، ريباسات، أنزيمات، أملاح معدنيّة.



التخليق تبعاً لتلف كيميائي لحَمْض الديوكسي ريبونوكلييك وحَمْض الريبونوكلييك في المستخلص، ويمكن إطلاقه من جديد بإضافة حمض الرنا المرسل. وهذه المنظومة اللاخلوية يمكن تثبيتها وحفظها لأسابيع عديدة من غير أن تفقد نشاطها (٣).

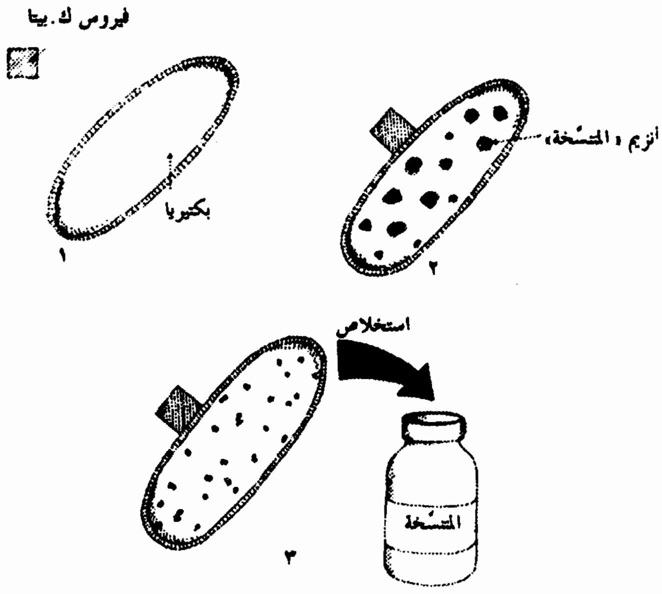


قام نيرنبرغ بتخليق حَمْض اصطناعي من الريبونوكلييك، يحتوي فقط - بدلاً من ٤ قواعد اعتياديّة A وG وC و U - على قاعدة اليوراسيل (متعدّد U). إذن، الثلاثيّة(*) triplet الوحيدة الممكنة هي

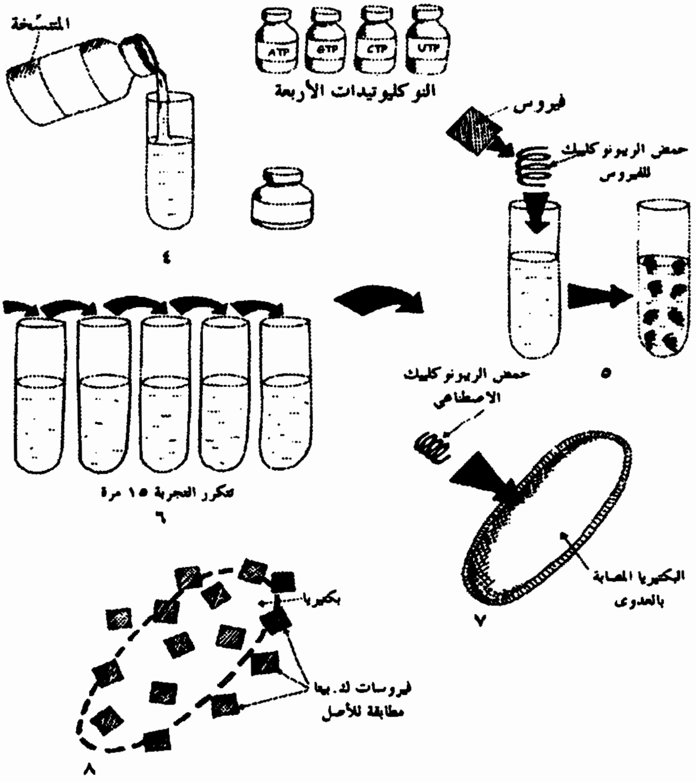
(*) الثلاثية "كلمة" في الرمز الجيني مكونة من مجموعة من ٣ قواعد وتناظر حمضاً أمينياً معيناً.

UUU. ما هو الحمض الأميني الذي يوافق هذا الرمز؟ يُقحم حمض الريبونوكليك الاصطناعي في المنظومة اللاخلوية. ومن بين الحموض الأمينية العشرين الموجودة، هناك واحد فقط يكون موسوماً بالنشاط الإشعاعي. أما التسعة عشر حمضاً الباقية فهي عادية (يوجد إذن ٢٠ أنبوباً يتضمن كل واحد منها حمضاً أمينياً موسوماً - يختلف من أنبوب لآخر - و١٩ حمضاً عادياً) (٤). يُخلّق البروتين في المنظومة بموجب الرمز الاصطناعي الذي يُدخَل في الأنبوب (٥). يتكوّن هذا البروتين من تسلسل نوع واحد من الحموض الأمينية: **فينيل ألانين** *phénylalanine* الذي يُكتب في رمز الحياة كالتالي: UUU.

يهاجم فيروس ك. بيتا بكتيريا الإِشْرِيكِيّةُ القُوْلُونِيّة. لا الفيروس ولا البكتيريا يحتويان على الأنزيم الصالح لتكاثر الفيروس (١). يظهر هذا الأنزيم (**المُتَنَسِّخَة** *replicase*) في البكتيريا حالما تُعدى من قِبل الفيروس (٢). من جهة أخرى، يُستخلص أنزيم "المُتَنَسِّخَة" من البكتيريا ويُنقّى جيداً.



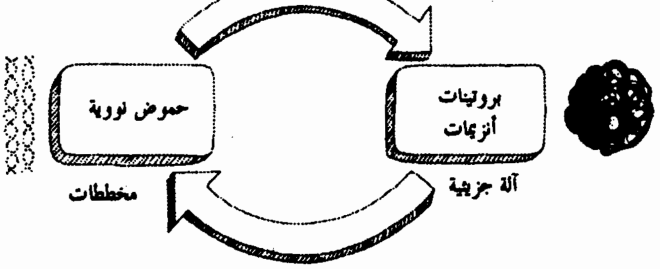
توضع "المُتَنَسِّخَة" المُنقّاة في أنبوب اختبار. ثم تُضاف إليها أربعة نُوكْلِيُوتيدات ـ انطلاقاً منها يُكوَّن حَمْضُ الريبونوكليك ـ ثم أملاح المغنيسيوم (٤). وقد أضاف سبيغلمان لهذا المزيج البسيط جداً كمية قليلة من حَمْض الريبونوكلييك المصاب بعدوى من فيروس ك. بيتا Q - bêta (٥). يتكرر هذا الحمض في العديد من النسخ بتحفيز من المُتَنَسِّخَة وانطلاقاً من الأنواع الأربعة للقطع المنفصلة (النُوكْلِيُوتيدات الأربعة)(*). هذا التفاعل هو ذاتي التحفيز.



(*) النكليوتيدات الأربعة هي: ثلاثي فسفات الادينوزين (ATP)؛ ثلاثي فسفات الغوانوزين (GTP)؛ ثلاثي فسفات السيتيدين (CTP)؛ ثلاثي فسفات اليوريدين (UTP).

تتكرّر هذه التجربة خمس عشرة مرّة. في كل مرة، يُدمج حَمْض الريبونوكلييك الاصطناعي في مزيج مماثل أينما يعطي "جرثومة" (٦). في نهاية التجربة الخامسة عشرة، تبطل فرص ظهور حَمْض الريبونوكلييك الأصلي من جديد. يُنقّى حَمْض الريبونوكلييك الاصطناعي الذي يُصنع في الأنبوب الخامس عشر بعناية ثم يُحقن في بكتيريا القولونيّة الإشريكية (٧). يكون هذا الحمض قد حفظ قدرته على العدوى: إذ تُكتسح البكتيريا بسرعة من قبل فيروسات ك. بيتا المطابقة للأصل: بعد ذلك، تنفجر (٨).

تدل هاتين التجربتين على أن تفاعلات قاعدة الحياة يمكن أن تحصل في أنبوب اختبار. على أننا، في جميع التجارب، ننطلق سواء من حَمْض الريبونوكلييك التخليقي (متعدّد U) ومستخلص بيولوجي (منظومة لاخلوية)، سواء من حَمْض الريبونوكلييك البيولوجي (فيروس ك. بيتا) ومزيج تخليقي. وفي كلا الحالتين، نستعمل **معلومة بيولوجيّة موجودة قبلاً**. وهنا يحضر ببالنا مباشرة سؤال آخر: من أين تأتي المعلومة البيولوجية؟ هل من الممكن تحديد متى وكيف بدأ نشاط التداخل الحيوي، الحموض النوويّة - البروتينات، بحيث ترمّز الأولى الثانية، والثانية الأولى؟ بمعنى آخر: ما هو مصدر الرمز الجيني؟



نجد أنفسنا من جديد في حلقة مفرغة تماثل تلك التي للدجاجة والبيضة (انظر ص ص ١٠٧ ـ ١٠٨). فإذا كانت البروتينات هي أول من ظهر فأين خزنت المخططات الضروريّة لصنعها. وإذا كانت الحموض النووية هي أول من ظهر، فكيف حصل تجمّع المعلومات الدقيقة التي تتضمنها حسب السلّم الجزيئي، بدون البروتينات؟

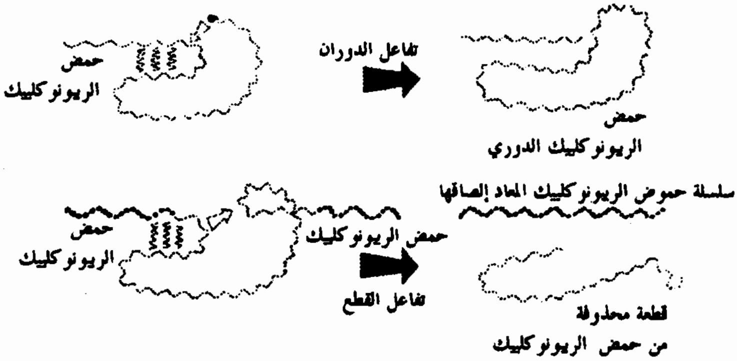
لم يكن ممكناً فض هذه الحلقة المفرغة إلا بواسطة التجارب التي جرت حديثاً. ففي يناير ١٩٨٦، ظهر مقال في المجلّة الأمريكيّة *Science* وصار ذا أهمّية في تاريخ أصل الحياة. فقد أثبت الباحثان توماس. ر. سش Thomas R. Cech وآرثر. ج. زوغ Arthur J. Zaug، من جامعة كولورادو للمرة الأولى أن جزيء حمض الريبونوكلييك يمكن أن يكون في الوقت ذاته ركيزة للمعلومة الجينيّة وأنزيماً يتدخّل في تحوّله الذاتي. وهذا يعني أن نفس الجزيء يمكنه أن يكون ذاكرة بيولوجيّة كما يمكنه أن يكون حفّازاً. في حين يكون، وإلى الآن، الاستئثار بالتحفيز البيولوجي بدون نقاش من شأن البروتينات. اعتُبر هذا الاكتشاف انقلابا أساسياً، ومكّن في فجر يوم جديد من تبصّر مصدر آليات الإنتاج البيولوجي وآليات ترميز المعلومة الجينيّة.

اكتشاف سش

يمكن لسلاسل حمض الريبونوكلييك (انظر ص ٨٥) أن تتجزأ داخل الكائنات العليا (التضفير *splicing*) لتعطي سلاسل أقصر من غيرها تتحول إلى بروتينات. في حالة الكائن المجهري المُسمّى رُباعِيَّةُ الغِشاء *Tetrahymena*، تتجزأ سلسلة حمض الريبونوكلييك التابعة للريباسات ذاتياً، وتتجمع مرة أخرى وتنفتح من جديد في نقاط محدّدة لاعبة دوراً تحفيزياً كنا نعتقد أنه خاص بالأنزيمات.

بعد نشر مقال سش ، اكتشف الباحثون العديد من الوظائف التحفيزية الأخرى والخاصة بحمض الريبونوكلييك. ولتوضيح الوظيفة

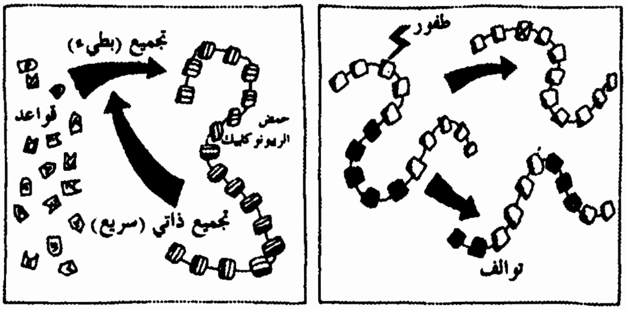
"الأنزيميّة" الجديدة، اقترح والتر جيلبرت Walter Gilbert، الحائز على جائزة نوبل سنة ١٩٨٠، في يناير ١٩٨٦ تسمية حموض الريبونوكلييك هذه ريباسات، وهي عناصر محدَّدة في أصل الحياة. وهكذا، وبمجموعة من الرسوم البسيطة، نستطيع توضيح التطوّر الارتقائي لأنظمة الترميز وآليات ترجمة المعلومة البيولوجية.



١ ـ في الحساء البدائي أو على الطين، تتجمع القواعد النووية المصنوعة بالتخليق المنافي للحياة (انظر ص ١٢٤)، مكوّنة سلاسل قصيرة من حمض الريبونوكلييك البدائي (تكون له تقريباً بنية كيميائية بسيطة). تحفّز هذه السلاسل الأولى بدورها تكوين السلاسل الجديدة الأكثر طولاً في غضون الدورات المتعاقبة من تجفيف وإعادة تميّه المناطق أينما توجد (راجع التفاعلات ذاتيّة التحفيز المتشابهة في التكاثر الجزيئي، ص ١٤١).

٢ ـ من جرّاء إعادة التوليف بين السلاسل والتغيّرات الكيميائية تولد وظائف جديدة. يمكن أن تعمل قوانين الانتقاء الطبيعي، مثلاً، وسط القطرات المجهرية. وقد أظهر والتر جيلبرت أن هذه التركيبات

التي تحدث بواسطة العناصر التي تغيّر أوضاعها بين العديد من سلاسل حمض الريبونوكلييك (نسميها "يَنقُوْلات" *transposons*) يمكن اعتبارها مثل المكافئ الجزيئي للتوالد الجنسي لدى الحيوانات.

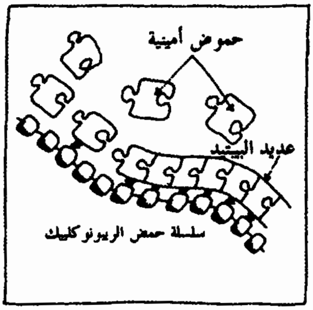


٢ ١

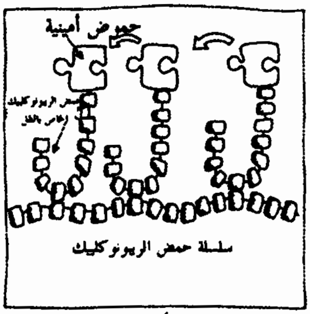
٣ - إن العلاقة بين شكل الحموض الأمينية وأشكال "التجاويف" و"البروزات" المتكوّنة في سلاسل حمض الريبونوكلييك تقود شيئاً فشيئاً إلى اختيار "الحروف" و"الكلمات" الأولى للرمز الجيني: وهي علاقة خاصة بين تعاقب قواعد الحموض النووية وتعاقب الحموض الأمينية.

٤ - يتحسّن النشاط الأنزيمي لسلاسل حمض الريبونوكلييك بتجمّعها مع عناصر خارجية (أيونات معدنية، نواقل الإلكترونات). إذن، تستطيع سلاسل حمض الريبونوكلييك أن تحفّز تكوّن سلاسل البروتينات، أولاً بطريقة مباشرة ثم بواسطة سلاسل قصيرة من حمض الريبونوكلييك بها ترتبط الحموض الأمينية (طليع حمض الريبونوكلييك الخاص بالنقل) كما "ترصّف" هذه السلاسل الحموض الأمينيّة في ترتيب ميسّر لتفاعلات البلمرة(*).

(*) أثبتت الأبحاث الحديثة لكل من ي. م. هو Y. M. Hou وب. شيمل P. Schimmel من معهد ماساشوستس للتكنولوجيا MIT إمكانية وجود نظام ترميز أكثر بساطة (يبدأ من قاعدتين) وأقدم من الرمز الحقيقي. هذا "الرمز" المُسمّى خطأً بـ"الرمز لجيني الثاني" يسمح بمعرفة حمض الريبونوكلييك والحمض الأميني المناسب بواسطة الأنزيم "الرابط".



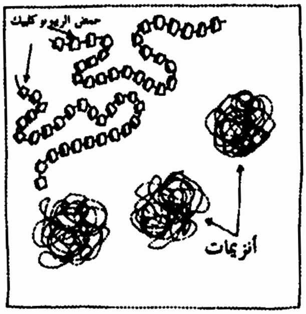
٣



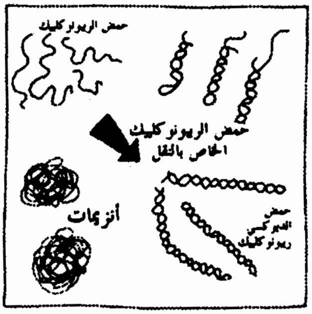
٤

٥ ـ إن البروتينات المصنوعة بسرعة أثناء التخليقات "العشوائية" على المطارس التحفيزيّة المعدنية تتكشّف تدريجياً على أنها حفّازات بيولوجية أفضل من سلاسل حمض الريبونوكلييك. من جهة أخرى، يزداد تنوّع التفاعلات التي تسرّعها هذه البروتينات. بذلك، تختار الأنزيمات الأولى نفسها بنفسها وتنحّي أحماض الريبونوكلييك إلى مركز أقل أهمية.

٦ ـ في النهاية، تُوجِد سلاسل حمض الريبونوكلييك، بمساعدة الأنزيمات، لولباً مزدوجاً من حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك مقدِّمة فوائد حاسمة لترميز المعلومة البيولوجية: استقرار كبير جداً، آليّة إصلاح الأخطاء التي تجيز في الأثناء تغيّرات وإعادة تركيب. يُنحّى الريبونوكلييك إلى وظيفة الوسيط التي يشغلها اليوم في الأجهزة الحيّة (انظر ص ص ٨٣ ـ ٨٦).



٥



٦

بذلك تُفضّ حلقة مُفرغة ويسقط مُعتقد: ليست البروتينات (الأنزيمات) ضرورية لأصل الحياة لأن حمض الريبونوكلييك يمكنه أن يكون داعماً للمعلومة البيولوجية وحفّازاً في الوقت نفسه، ليس فقط بتجمّعه الذاتي، وإنما أيضاً بتجمّع سلاسل البروتينات. ينشأ الرمز الجيني، من غير ريب، عن العلاقات الداخلية المتعاقبة بين حمض الريبونوكلييك وحمض الريبونوكلييك الخاص بالنقل والبروتينات ثم حمض الديوكسي ريبونوكلييك، وذلك وسط الأنظمة الذاتية قيد التطوّر(القطرات المجهرية) والخاضعة للانتقاء الطبيعي.

لقد اقترح ج. شرام G. Schramm نموذجاً بارعاً وقادراً على لعب دور قاعدة البحث والمساعدة في فهم آليات الانتقاء الطبيعي على المستوى الجزيئي. يمكن لبعض الجزيئات مثل حمض الريبونوكلييك أن تحفز تكوّنها الذاتي. لكن يمكن أيضاً لمثل هذا التحفيز أن يكون متبادلاً ويطبّق على منظومتين أو ثلاث منظومات منفصلة.

في الواقع، تسرّع سلسلة حمض الريبونوكلييك، التي هي قيد التطوّر في الوسط البدائي، تكوّن سلسلة أخرى إضافية. وهذه الأخيرة تسرّع بدورها ملايين المرات تكوّن السلسلة الأولية. يوجد إذن تحفيز متبادل. فإذا استطاعت الآن واحدة من هذه المطارس الجزيئية تشكيل حفّاز عضوي (بروتين مثلاً) **يراقب بدوره تخليق مطرس الانطلاق...**، فسيكون هنالك إذن تحفيز متبادل منصبّ على ثلاث بنى جزيئية مختلفة، بحيث **تكون كل واحدة منها ضرورية لوجود الاثنتين الأخريين**. يفضي التنظيم الذاتي في مثل هذه الشبكات إلى الانتقاء الذاتي.

وبما أن هذه المنظومات الثلاث مرتبطة الواحدة بالأخرى بصورة لاعكوسة فسوف يخصّ الانتقاء الطبيعي بالحفظ أجهزة الترميز والتحفيز الأكثر نجاعة وحدها.

لقد أمكن ظهور عملية من هذا القبيل وسط القطرات المجهرية. لكن عندما تضخّمت هذه المنظومات البدائية ثم تشظّت، كان لتلك التي ورثت المعلومة المرموزة ـ مهما بلغت درجة بدائيتها ـ حظوظاً وفيرة جداً للصمود. إذن لا يكون مصدر هذه العمليات مندرجاً إلا ضمن إطار نهج متكامل يعتني "بالمنظومات قبل الحياتية". تنتج مثل هذه المنظومات عن الارتباط الداخلي للعديد من العوامل: نقل الطاقة، نقل المعلومة، مطارس تحفيزيّة معدنيّة فعضويّة، تنسّخ ذاتي جزيئي، وجود الطين والأيونات المعدنيّة، دور القطرات المجهرية التي تحتوي على الجزيئات وتلعب دوراً محصّناً ييسّر الانتقاء الطبيعي.

يمكن هنا مشاركة ن. هـ. هورويتز N. H. Horowitz في اعتقاده أن الكائنات الأولى القادرة على التكاثر توجد في الوسط الذي يحيط بأجزاء "ضروريّة لتركيبها". إذ يكفيها تجميع هذه الأجزاء. لكن عندما يختفي واحد من هذه الأجزاء، تكون الكائنات الوحيدة القادرة على التكاثر هي تلك التي تصنع، عن طريق تخليقات داخلية مطورة أكثر فأكثر، الأجزاء الضرورية لتكاثرها. **وتُقصى الأخرى**. تتوصل هذه الكائنات البدائية في نهاية المطاف إلى استعادة تركيبتها كاملة في محيط لا يحتوي أبداً على عناصر أصلية للتركيب.

وهنالك العديد من الفرضيّات الأخرى رهن المراجعة. ومع ذلك يمكننا إبراز **اتجاهين كبيرين اثنين**. فبالنسبة للبعض، فإن الحموض النووية المُكَوّنة في حالات سابقة للبيولوجيا هي التي حدّدت، عن طريق الطفور والانتقاء، كامل الفترة التي أعقبت التطوّر. أما بالنسبة للآخرين، فإن وظيفة الحفظ الذاتي هي التي خطت مثل هذه الخطوة. لكن نظام ترميز المعلومة، البسيطة جداً في البداية، سوف لن يتحسن إلا عندما تتعقّد الكائنات الأولى أولاً بأول

لتصل إلى حمض الريبونوكلييك ثم إلى حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك الفعلي، لكن سيكون ذلك في مرحلة لاحقة بعيدة.

في توجّه الأبحاث الحالية، يبدو أن بعض الكتّاب ـ الكيميائيين منهم بوجه خاص ـ يعلّقون أهمية كبيرة جداً على المظهر **البنيوي** الوحيد للحياة على حساب مظهرها **الوظيفي**. من جهة أخرى يعتبر البعض أن ما هو أكثر جدوى هو البحث في ما يمكن أن تكون عليه هذه التطورات الكيميائية الأولية للحياة في أجهزة بدائية جداً، ولكنها تحظى، "في شكل برعم" وعلى المستوى الجزيئي، بالوظائف الأساسية للكائنات الحيّة الحقيقية. وكما لفت البيولوجي الأمريكي ب. وايس P. Weiss الأنظار إلى حقيقة أنّ "الحياة هي تطوّر ديناميكي. . .[ ] وعناصر هذا التطوّر لا يمكن أن تكون إلا **تطوّرات أوّليّة** وليست ذريرات أوَّلِيَّة أو وحدات أخرى ساكنة." فإنه انطلاقاً من الدراسة الكيميائية لهذه التطوّرات الديناميكية المنافية للحياة، سيصبح بالإمكان من غير شك فهم التطور البطيء الذي في أثنائه تتحسن الحفّازات البيولوجية وتفاعلات الاستقلاب والجهاز التوالدي.

هل أنّ هنالك نوعاً واحداً من الكائنات قادراً على التوالد، مما يفضي بالتالي إلى سلالة واحدة؟ أم إن هناك كائنات عديدة (وهو الأمر المرجح)، تتطور بالتوازي وتنجح في اكتساب جهاز توالدي مماثل يعتمد على نموذج ترميز أكثر فعاليّة؟ لا نملك بعد أن نبدي رأينا. لكن، ربما تمكّن هذه الفرضية الأخيرة من تفسير السبب الذي جعل شجرة نسب الكائنات الحية تتفرّع قبل "الخلايا الأولى" التي وُضعت قديماً في أصل الحياة.

التخليق الضوئي والتنفّس: رأسمال الحياة

للكائنات البدائية غيريّة التغذية "شهيّة" مفترسة. "فالحساء البدائي"، الذي كان قديماً غنياً بالمواد العضوية، يتخفف أكثر فأكثر.

كما أن التخليقات العضوية التي يرجّح أن تواصل حدوثها في الطبقات العليا من الغلاف الجوي قد أصبحت بطيئة جداً لتُوازِنَ النفاد السريع للمدّخرات الطاقيّة للمحيطات.

في مثل هذه الظروف، تكون الكائنات الوحيدة القادرة على البقاء هي تلك التي تستطيع أن تصنع الأغذية الخاصة بها انطلاقاً من الجزيئات البسيطة ومن الطاقة الشمسية. هذه التخليقات هي من الآن فصاعداً ممكنة لأن ثاني أكسيد الكربون وفضلات التخمير تظهر بكمية كبيرة وتنحلّ في الماء. يمثّل هذا الجزيء البسيط ذو الذرة الواحدة من الكربون عنصراً للبناء يصلح في صنع المركّبات الأكثر تعقيداً. من جهة أخرى، ينفذ ضوء الشمس بما يكفي من العمق إلى المحيطات، فيما ترشح الأشعة فوق البنفسجية الشديدة ـ وبالتالي الأشد ضرراً ـ بواسطة حجاب من الماء. وقد أثبت سيريل پونامپيروما Cyril Ponnamperuma سنة ١٩٨٢ أن القَوصَرَات والكرات المجهرية تلعب دور الواقي من الأشعة فوق البنفسجية. كما أنّ تكيّف الكائنات البدائية ذاتيّة التغذية في هذا الوسط الجديد قد أصبح ممكناً إلى حد ما بواسطة عمليات الطفور والانتقاء الطبيعي. كذلك، من المرجح أن تكون آليات التوالد ـ في هذه المرحلة ـ قد سبق أن أصبحت مؤمَّنة.

يكون الكلوروفيل قادراً على تخزين الطاقة وإعادتها في شكل يسهل استغلاله (انظر ص ٦١)(*). وبفضل هذا المصدر الجديد للطاقة الداخلية، يمكن أن تحدث لدى بعض الكائنات إعادة تنظيم للسلاسل القديمة من التفاعلات الاستقلابيّة. كما تكتسب الكائنات التي تُجهَّز بآليات التخليق الضوئي هذه بميزة تطوريّة كبرى.

مثل التخمير، سيعمل التخليق الضوئي على تغيير الوسط على

(*) قبل البُرفيرين بكثير نعتقد أنّ البيريدوكسين، وهو بروتين صغير يحتوي على نحو خمسين حمضاً أمينياً وله موضع حيوي يكوّنه اجتماع الكبريت بالحديد، يلعب دوراً أساسياً في تطوّرات التحفيز الضوئي الكيميائي.

نحو لاعكوس. تعاود المركّبات العضوية الغنية بالطاقة (مثل الغلوكوز)، والتي بدأت تنقص في المحيطات البدائية، الظهور بكثرة لأنها من نواتج التخليق الضوئي. وبحسب أوپارين، تستطيع بعض الكائنات بعد ذلك العودة إلى طريقتها القديمة في التغذية: **امتصاص المواد الكيميائية المستمدة تماماً من الوسط**. ومع ذلك تكون هذه الكائنات غيريّة التغذية والمُتطوّرة(*) في تبعيّة كاملة للأغذية التي تزودها بها الكائنات ذاتية التغذية والحديثة الظهور. هكذا ندرك، في بداية الحياة، جذور هذا التباعد الأساسي، ولكن الإضافي بالرغم من ذلك، الذي انطلاقاً منه قُسِّمَ الحديث في بداية هذا الكتاب بين النباتات (ذاتيّة التغذية) والحيوانات (غيرية التغذية).

يعتبر **الأكسجين** أحد النواتج الثانويّة الرئيسية للتخليق الضوئي. فهذا الغاز، الذي يعتبر مكوّناً أساسياً لمحيطنا الهوائي الحالي، يختفي بسرعة كبيرة إذا ما انتهت الحياة على الأرض. إن ظهور هذا الأكسجين سيقلب ظروف الحياة. والواقع أن الأكسجين ينتج في الطبقات العليا من الجو ويوّلد، تحت تأثير الأشعة فوق البنفسجية،الأوزون(**). بذلك تتكوّن طبقة واقية على نحو ٣٠ كيلومتراً تقريباً من سطح الأرض. ترشّح هذه الطبقة أشعة الشمس وتمتصّ الأشعة فوق البنفسجية الأشد طاقة. لكن مصدر وتاريخ تكوّن طبقة الأوزون هذه لا يزال موضوع نقاش. فبالنسبة للبعض، تكوّنت هذه الطبقة **قبل** ظهور تفاعلات التخليق الضوئي، وذلك بتراكم بطيء للأكسجين وتزايده فوق نفسه وهو ما ينتج عنه بالتالي تفكك ضوئي لبخار الماء(***). فإذا أوقفنا بعض الإشعاعات فوق البنفسجية، تُوقف طبقة

(*) كائنات غيريّة التغذية من "الجيل الأوّل" وهي القطرات المجهريّة.

(**) جزيء مكوّن من ٣ ذرات أكسجين O_3 يتهدّد وجوده اليوم من جانب ذرّات الفلوروكربون **Chlorofluorocarbones** الموجودة خاصّة في علب المرذاذات.

(***) يتفكك بخار الماء في الجو المرتفع، بفعل الأشعة فوق البنفسجية، إلى أكسجين وهيدروجين.

الأوزون أيضاً التخليقات العضوية. لكن الكائنات القادرة على صنع أغذيتها بالتخليق الضوئي هي وحدها من يواصل الحياة في هذا الوسط الذي تقلّ فيه المواد المُغذّية.

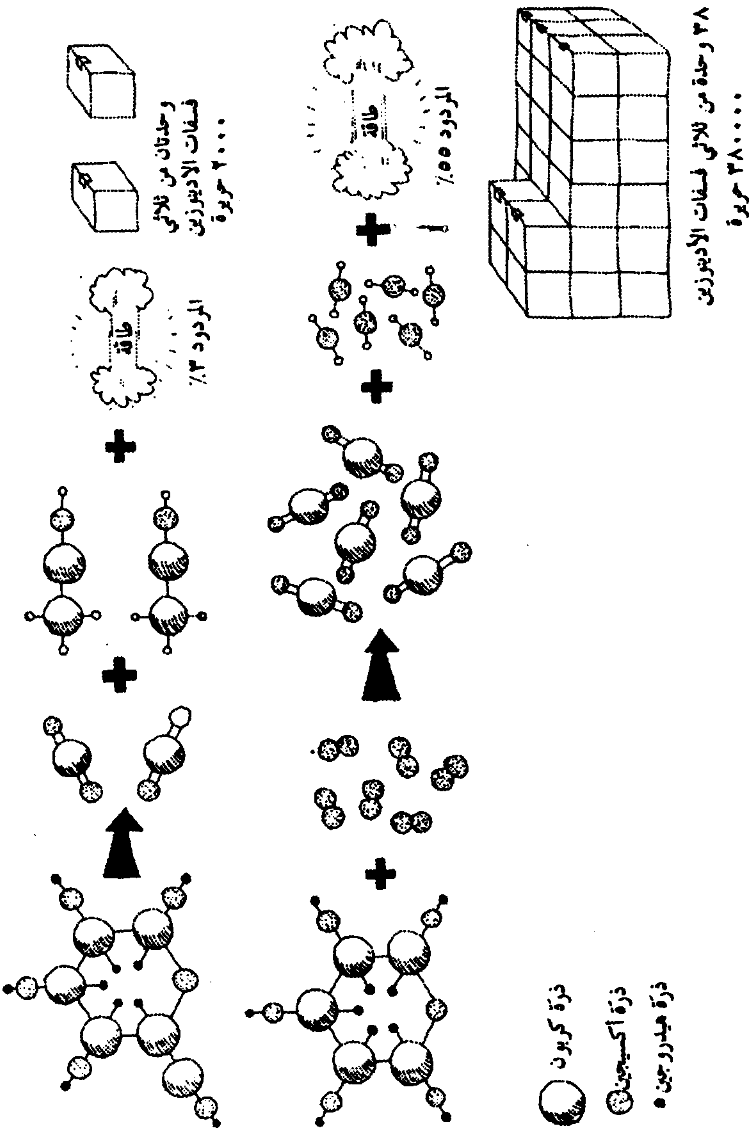
وعلى أية حال، فبامتصاصها للإشعاعات الضارة، سمحت طبقة الأوزون نهائياً للكائنات الحيّة أن تجتاح الأرض والأجواء.

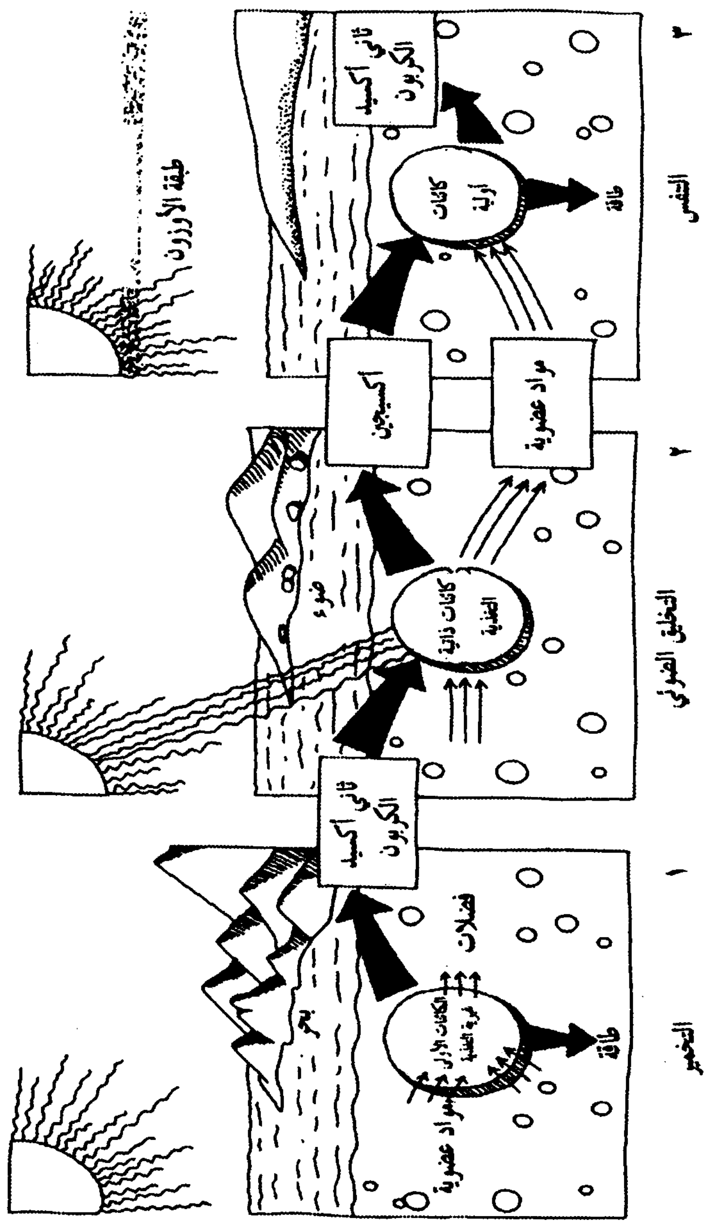
يعتبر اكتساب الكائنات الأولى ذاتيّة التغذية لآليات التخليق الضوئي خطوة كبيرة إلى الأمام. بعد ذلك، لم تعد الكائنات تعتمد أبداً على مُدّخرات محدودة للمواد العضوية المتراكمة خلال مئات الملايين من السنين. وبما أنها أصبحت أكثر استقلالاً، وقادرة عبر التخليق الضوئي على صنع المركّبات الأساسية للحياة وإنتاج الطاقة التي تحتاجها عن طريق التخمير، فسوف يكون بإمكان الكائنات البدائية أن تحيا بسهولة أكثر وإلى زمن بعيد. لكن، يستوجب الأمر أيضاً تطوراً طويل المدى حتى يتحسّن مصنع التخليق الضوئي الصغير الذي تمثّله **صَانِعَةُ الكلوروفيل** خير تمثيل...

وإلى جانب التخليق الضوئي، يطلق تفاعل آخر ضروري للحياة: هو تحوّل آزوت الهواء إلى أُمونيا بواسطة البكتيريا المثبّتة للآزوت. هذه الأَمونيا هي عنصر محدِّد في صنع الحموض الأمينيّة. وهي بشكل حاسم البكتيريا التي تحيا بتكافل تام مع جذور النباتات البقلية والتي تسمح للحيوانات (التي أكلت هذه النباتات) بالحصول على الحموض الأمينية الضروريّة لصنع البروتينات في خلاياها.

من المثير أن نستنتج أنّ اثنين من التفاعلات الكيميائية هما اليوم أساس تطور الحياة على الأرض، وذلك عن طريق تزويد الكائنات الحيّة بالطاقة والبروتينات: تحوّل الكربون المعدني (CO_2) إلى سكّريات بواسطة التخليق الضوئي وتحوّل الآزوت المعدني (N_2) إلى مجموعة أمونيا (NH_4^+) بواسطة البكتيريا المثبّتة للآزوت.

يُعتبر تأثير التخمير ضعيفاً على المستوى الطاقي. إضافة إلى


وحدتان من ثلاثي فسفات الأدينوزين ٢٠٠٠٠ حريرة
طاقة
المردود ٣٪
طاقة
المردود ٥٥٪
٣٨ وحدة من ثلاثي فسفات الأدينوزين ٣٨٠٠٠٠ حريرة
ذرة كربون
ذرة أكسيجين
ذرة هيدروجين


طبقة الأوزون
بحر
ثاني أكسيد الكربون
مواد عضوية
الكائنات الأولى غيرية التغذية
فضلات
طاقة
ضوء
كائنات ذاتية التغذية
أكسيجين
مواد عضوية
كائنات أولية
ثاني أكسيد الكربون
طاقة
١ التخمير
٢ التخليق الضوئي
٣ التنفس

ذلك، يتكوّم العديد من المركّبات "المحروقة" بشكل غير تام في الوسط. إلا أن كل شيء سيتغيّر بظهور الأكسجين إذ "يتجدد شباب" آليات التخمير البالية بغتة.

يُعتبر الأكسجين متعطشاً جداً للإلكترونات، فهو ينتزعها من الأجسام التي تملكها أثناء التفاعلات العنيفة أحياناً (احتراق، انفجار). مثل هذه التفاعلات هي حالات أكسدة. أما التخمير والتنفس، فهي كما سبق أن رأينا، حالات احتراق بطيئة.

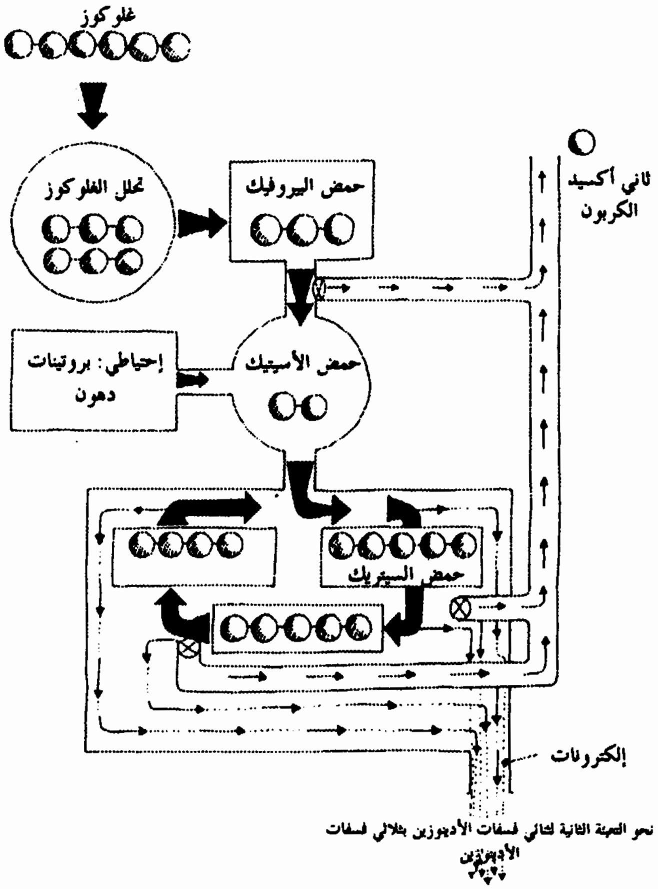
يسمح التنفس للكائن بسحب الكثير جداً من الطاقة من جزيء الغلوكوز، "حارقاً" إياها كلياً. فضلاً عن ذلك، يمكن الاستغناء عن مواد التفاعل في البيئة بدون خطر بما أن الأمر يتعلّق **بالماء وثاني أكسيد الكربون**.

ويشكل التنفس ثورة بالنسبة للتخمير. ويمكّن الرسم أعلاه (ص ١٨٨) من مقارنة هاتين السيرورتين:

يتولى التنفس زيادة الضريبة على التفاعلات التي سبق وجودها: تتفكك القطعة التي تحتوي على ثلاث ذرات كربون، وهي **حَمْض البَيرُوفِيك** *pyruvique* ـ راسب التخمير ـ إلى قطعة لها ذرّتا كربون وهي **حمض الأسيتيك** *acétique*(*) وتُقحم كوقود في "الغلاية" الصغيرة التي أسميناها "طاحونة الحياة" (اسمها التقني هو دَورَةُ كريبس Krebs). وفيما يلي ما يحدث مع قليل من التفاصيل (انظر الرسم على الصفحة التالية). "تدور" هذه الدورة بدون أن تتوقف أبداً، وتتحد القطعة ذات الذرات الأربع من الكربون في نهاية الدورة مع قطعة جديدة بذرتي كربون أتت بها الأغذية.

تكون كل هذه التفاعلات المتتالية بالتأكيد مسرّعة ومراقبة ومضبوطة من قبل أنزيمات خاصة. وهي لا تحدث في حالة من

(*) في الواقع نقصد أسيتيل التَّميم A، وهو قطعة بيولوجيّة ذات أهمّية كبرى. يمكن أن يُزوّد مباشرة بواسطة الاحتياطات المغذّية (دهون، بروتينات).



طاحونة الحياة (دورة كريبس)

الفوضى بل في بنى منظّمة جداً، تتشكّل شيئاً فشيئاً من خلال التطور والتي منها يتمثّل الشكل المُطوّر الموجود في **المتقدّرات**.

بواسطة تفاعلات التخمير البسيطة، التي تستعمل الغلوكوز وثُلاثِي فُسْفاتِ الأَدِينُوزِين والأنزيمات، تضمن الكائنات الأولى مباشرة "حياتها الدنيا". يأتي بعدها دور التخليق الضوئي، حيث إنه باقترانه بتفاعلات التخمير واستعماله ثاني أكسيد الكربون المُطلق

حديثاً يضمن لهذه الكائنات وبشكل نهائي **الحفظ الذاتي**. أخيراً، عبر التنفس وباستعمالها للأكسجين المُطلق بالتخليق الضوئي، يكون تحت تصرف الكائنات البدائية كامل الطاقة التي تحتاجها، انطلاقاً من كمّية ضعيفة من المادّة العضوية المُغذِّية. لكن هذا ليس كل شيء: فهي توجد على رأس رأسمال وفائض طاقي يجب أن يوفر لها كامل تَتِمَة التطور(انظر الرسم على ص ١٨٨).

هكذا، تجد نفسها شيئاً فشيئاً منتقاة كائنات تتمتع بالحفظ الذاتي (تخمير، تخليق ضوئي، تنفس) والتنظيم الذاتي والتوالد الذاتي بما يجعلها توصف نهائياً بـ"الكائنات الحية".

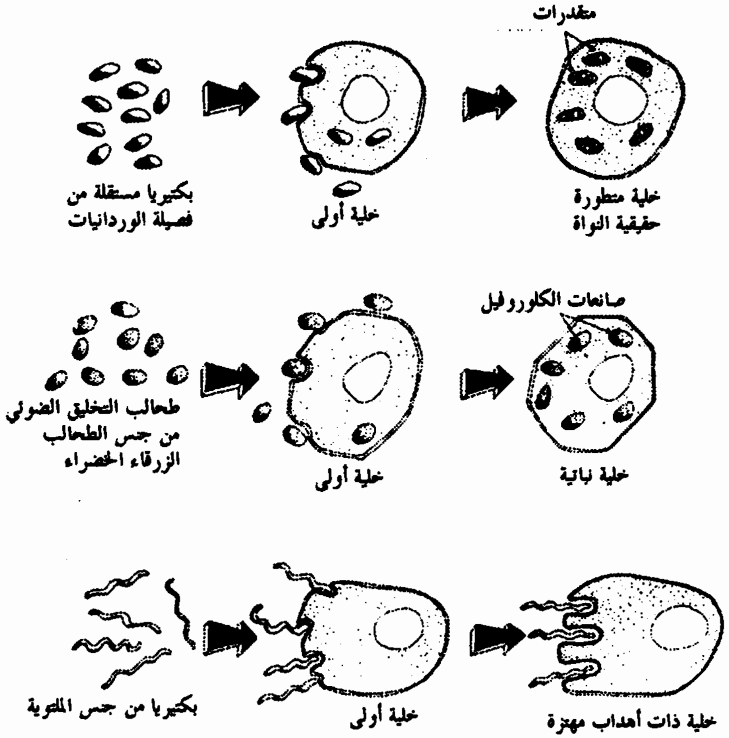
هذه الكائنات البدائية هي، على الأرجح، أولى البكتيريا والطحالب التي يُعثر على بقاياها في صخور ترقى إلى أكثر من ثلاثة مليارات من السنين.

جذور التطوّر البيولوجي

في يوليو ١٩٨٧، قام كل من ج. م. شوبف J. M. Schopf وب. م. باكر B. M. Packer، بعزل الكائنات المجهرية الأحفورية: وهي أقدم الكائنات التي حُددت وحُفظت في رواسب تعود إلى ٣,٣ ـ ٣,٥ مليارات سنة وتنتمي إلى تكتّلات صخرية بأستراليا. تدل البنية الكروية لهذه الخلايا، التي يتراوح قطرها بين ٨ و٢٠ ميكروناً، على أن الأمر يتعلّق ببكتيريا ذاتية التغذية، وقادرة على التخليق الضوئي وبالتالي مُنتجة للأكسجين. أي كائنات حية معقّدة وُجدت قبلاً في عصر بعيد جداً.

ما هو مصدر الخلايا ذات النواة (حقيقيّة النواة) التي نعثر عليها لدى الحيوانات والنباتات العليا؟ تحتوي هذه الخلايا على عُضَيّات (أعضاء صغيرة جداً) ضروريّة لعملها. من أمثلة ذلك المتقدّرة (مصنع لتحويل الطاقة؛ انظر ص ٦٤)، وصانِعَةُ كلوروفيل النباتات الخضراء (مصنع التخليق الضوئي، انظر ص ٥٧)، والسياط التي تسمح بحركة

الخليّة (مثلما يحصل لدى المُتَلَحْفَة *chlamydomonas*، انظر ص ٣٤). وهنالك فرضيّة أصليّة ومثمرة بالخصوص، وضعتها لين مارغوليس Lynn Margulis من جامعة بوسطن سنة ١٩٧٠، وهي تبدو اليوم مُثبتَة بتحليل بواسطة الحاسوب لمتواليات الحموض النووية والبروتينات. ويمكننا في الواقع، انطلاقاً من هذه المتواليات، إعادة رسم التطور الجزيئي للكائنات البدائيّة التي تحدّرت منها الخلايا العليا (أعمال دايهوف Dayhoff وشوارتز Schwartz). وبالنسبة للين مارغوليس، كانت المتقدّرات قديماً بكتيريا حرّة بينما كانت صانعات الكلوروفيل طحالبَ وحيدة الخلية مستقلة متخلّقة ضوئياً. تتميّز هذه الكائنات البدائية بتعايشها في الخلايا الأولى قيد



التطور. أما السياط، فهي تتحدّر من الجراثيم الخيطيّة (الملتويات) التي استعمرت الخلايا الأولى في فترة معينة من تطورها (انظر الرسم أعلاه).

تمكّن فرضيّة التعايش هذه أيضاً من تفسير السبب الذي يجعل المتقدّرات وصانعات الكلوروفيل تملك حمضاً من الديوكسي ريبونوكلييك مستقلاً عن ذلك الذي ينتمي لنواة الخلية التي فيها تتعايش، وهو ما يسمح بتضاعفها المستقل داخل هذه الخلية.

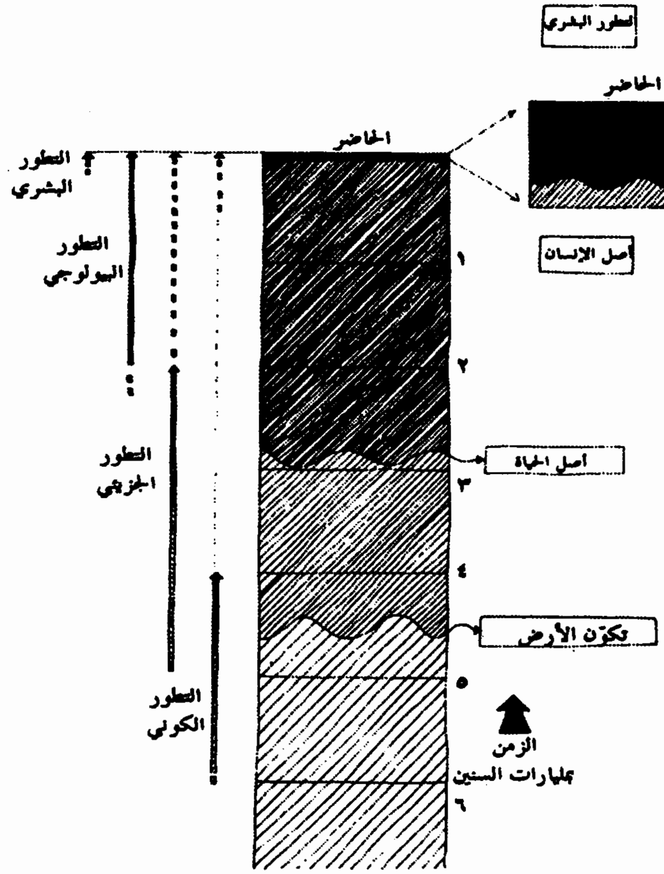
وهكذا تنشأ الخليّة المعقّدة للكائنات العليا من الترابط التكافلي للوحدات المستقلة التي تتقاسم بيئة مشتركة وتساهم في صيانة هذه البيئة الواقية والمغذّية.

يمكن أن يشمل مفهوم البيئة الواقية والمغذّية الكوكب بأكمله. فكيف يحدث، مثلاً، أنّ تكون درجة الحرارة المعتدلة للكرة الأرضيّة واقعة مباشرة في المنطقة الملائمة لتطوّر الحياة، بين ١٠ و٢٠ درجة مئوية؟ لأنّ الحياة، بمجملها، تكيّف البيئة بلا انقطاع مع الظروف التي تلائمها أكثر من غيرها. فالغلاف الحيوي *biosphere* (مجموع الكائنات الحيّة) والغلاف الجوي والغلاف المائي (بحار، بحيرات، محيطات) وقشرة الأرض الحجرية (الصخور والرواسب) تكون في تفاعل مستمر بحسب ثوابت زمنيّة متنوعة. كما أن السحب، ولون الأرض، ووجود غازات مثل ثاني أُكسيدِ الكَرْبون أو الميثان أو الأمونيا التي تساهم في عكس أو امتصاص حرارة الشمس، تتأثر بالحياة (نباتات، عوالق، بكتيريا، طحالب).

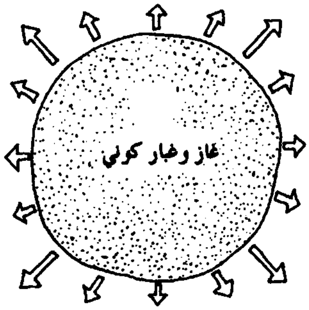
إن آليّات علم السيبرنطيقا العملاقة والذاتية التنظيم تعمل حسب مقياس الأرض. من هذا المنظور، يتشابه كوكبنا مع كائن حي يسعى للحفاظ على الاستتباب الخاص به (انظر ص ٩٨). ولكي نرمز إلى الوحدة السيبرنيّة التي هي الأرض، اقترح ج. أ. لوفلوك J. E. Lovelock سنة ١٩٦٧ تسمية هذا "الكائن" الكوكبي العملاق غايا (الأرض الأمّ باليونانية).

إنه قدر غايا Gaïa الذي يُعرّضه الإنسان اليوم للخطر بتغييره للآليات المعيدة للتوازن عن طريق زيادة مقدار ثاني أكسيد الكربون في الجو (بسبب الاستعمال المُكثّف للوقود الأحفوري)، أو نقص طبقة الأوزون أو التلوث الكيميائي والإشعاعي أو إزالة الغابات.

حرب ذريّة أم هندسة وراثية... يعرّض الإنسان أبناء جنسه للخطر وبيئة كوكبه أيضاً. لكن، كيف استطاع، في هذا الوقت القصير، أن يكتسب مثل هذه القدرات؟



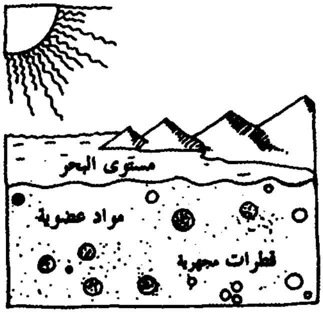
مدّة التطور



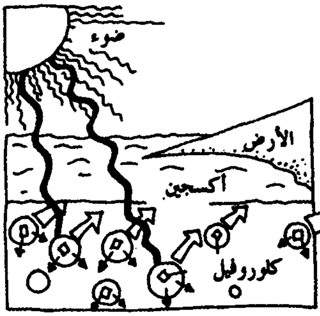
تكوّن الكون

تكوّن النظام الشمسي

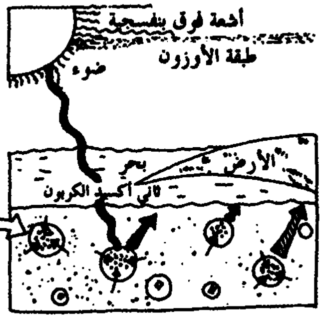
تراكم المواد العضوية تعقّد الجزيئات
تكون «الحساء» البدائي



تكوّن قطرات مجهرية من المواد العضوية

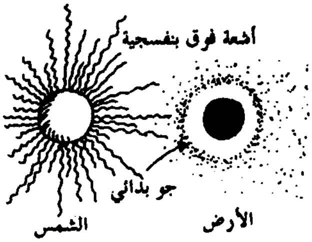


ظهور آليات التخليق الضوئي

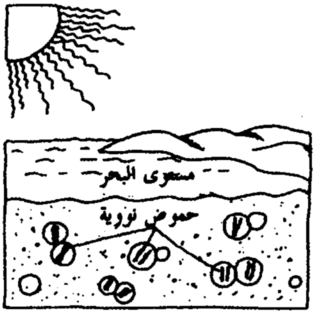


ظهور آليات التنفس. إنفصال بين الكائنات
ذاتية التغذية والكائنات غيرية التغذية

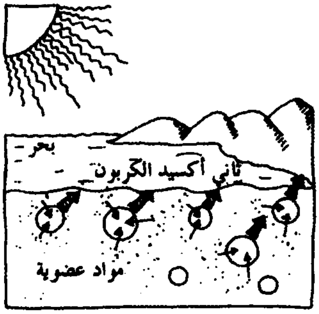
التخليقات العضوية في الجو البدائي للأرض



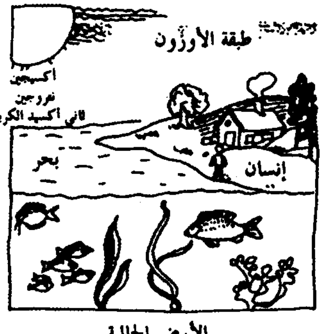
منظمة الشمس- الأرض



ظهور آليات التكاثر



ظهور آليات التخمير. الكائنات غيرية التغذية الأولى



الأرض الحالية

التطور البيولوجي

(*) المدوسة: جنس حيوانات هلامية بحرية تضيء في الليل.

القسم الثالث

إلى أين تمضي الحياة؟

- ١ -

الثورة البيولوجية:

آمال وتهديدات

التطور مستمر. لأمد طويل بدت الحياة وكأنّها حائرة بين مُستعمرات الأفراد وبين الأفراد المستقلّين. وقريباً، ستتجمّع الخلايا وستنتظم وتتفاضل في الأنسجة والأعضاء التراتبية والمتكاملة شيئاً فشيئاً في شكل مجتمع حقيقي من الخلايا: ألا وهو **الكائن الحي**.

فعن طريق مجموعة من حالات الطفور والانتقاء الطبيعي، تحسّن الكائنات الحيّة نفسها، وتتكيّف وتتعقد وتتشابك في شكل فيض هائل وغنى لامتناه من الأشكال والوظائف. تكافح الأنواع لتعيش. وينقرض بعضها إلى الأبد ويولد بعضها الآخر. من بين أحدث هذه الأنواع، سيوجد كائن يكون لممثليه، المجهّزين بعقل معقد وكبير بما يكفي، الفضول ليعكفوا يوماً على دراسة لغز أصولها. . .

هذا النوع، هو **الإنسان**. إنه كائن حي موهوب بالفضول، لكنه أيضاً غازٍ ومفترس. وبتصرفه هذا فإنه لا يخاطر بجنسه فقط بل بكوكبه أيضاً. لأن مسؤوليّة توجيه التطور البيولوجي تقع على عاتقه منذ الآن، ولأنه يضع إصبعه على مُحركات هذا التطور. وعليه يتوقف جزء كبير من مستقبل الحياة.

في غضون ثلاثين سنة، شهدت البيولوجيا ثورة استثنائية: جرى اكتشاف الرمز الجيني، وآليات تنظيم عمل الخلايا، وبنية الخلية

والأعضاء الجزيئية التي تكوّنها، ودور الغشاء الخلوي والاتصالات بين الخلايا، كما انبثقت اختصاصات جديدة: علم المناعة، وعلم الغدد الصمّاء العصبي، وكيمياء الدماغ، وهندسة الجينات، وحصل فهم أفضل لأصل الجزيئات السَرَطانية. وقد قادت هذه الثورة إلى تطوير أدوات وطرق جديدة تضع على كاهل البيولوجيّين مسؤولية ثقيلة: فلأوّل مرة لا يُحدّد التطور البيولوجيّ فقط بلعبة الطفور والانتقاء الطبيعي، وإنما يمكنه أن يكون على يد الانسان. وباعتباره قادراً على صنع أنواع حيوانية ونباتية جديدة، فقد أصبح بذلك "مهندساً للانسان"، و"ساحراً حقيقياً للجينات" التي يستطيع إعادة برمجتها حسب إرادته. ومثل هذه القدرة، المكتسبة في مدة وجيزة، خلفت وراءها مشاكل أخلاقية: التوالد **بالأنبوب** أو علاج الأمراض الجينيّة... كما كانت أيضاً سبباً لازدهار صناعي لا مَثيل له، يستند إلى علم حديث لم تُعرف اسقاطاته بعد، وكان مشجِّعاً لتقدم التكنولوجيا البيولوجية.

فهم لغات الحياة

ما الذي مكّن من القيام بمثل هذه الثورة، وبمثل هذا التقدم؟ أهو اكتشاف خاص؟ لا: بل تلاقي التطور العلمي والتقني. فالثورة البيولوجيّة التي نعيشها منذ عشرين سنة هي بالفعل ثورة في **مُعالجة المعلومة البيولوجية**. لقد فَهِم الإنسان اللغة الأساسية لجميع الكائنات الحية. بعد ذلك، تعلّم كيف "يتكلّمها" و"يكتبها". تُخزن هذه المعلومة البيولوجيّة بالمقياس الجزيئي في شكل خاص ينسجم جيداً مع المعالجة بالآلات الأوتوماتية والحواسيب، وهو شكل الجزيئات الضخمة من البروتينات والحموض النووية ـ أي رسائل مرموزة ومكتوبة بواسطة "حروف" هي بحد ذاتها الحموض الأمينية للبروتينات أو النوكليوتيدات لحَمْض الديوكسي ريبونوكلييك.

حدثت هذه الثورة في ثلاث مراحل كبرى: ارتقاء البيولوجيا الجزيئية (١٩٥٥ ـ ١٩٦٥) الذي مكّن من فهم أفضل لآليات الحياة بالتعبير الجزيئي؛ وبيولوجيا الخلايا (١٩٦٥ ـ ١٩٧٥) التي ركّزت على الخلية وقدراتها على التواصل، والهندسة البيولوجية (١٩٧٥ ـ ١٩٨٥) التي تشمل الهندسة الوراثية والتكنولوجيا المناعيّة والتكنولوجيا البيولوجية. واليوم تتداخل وتتشابك هذه المراحل، لكن كل واحدة منها تلعب دوراً حاسماً في الثورة البيولوجية: فهم الاتصالات والتفاعلات الجزيئية داخل الخلايا وفيما بينها.

لقد جاء اكتشاف واستعمال اللغة الجزيئيّة للحياة عقِب تلاحق شبيه بتلاحق ترجمة لغة أجنبية أو رمز سِرّي. وكان لا بد في البداية من حل طلاسم الرمز الجيني. ومثلما استطاع شامبوليون أن يفك رموز الحروف الهيروغليفية المصرية، فقد اكتشف ج. واطسون J. Watson و ف. هـ. س. كريك F. H. C. Crick بنية رمز الحياة. بينما وضّح نيرنبرغ، شموليّة الرمز الجيني.

بعد ذلك، نجح البيولوجيون في "أن يقرأوا في النص" رسائل الحياة. وقد تم ذلك بفضل الآلات الأوتوماتية التي جرى تطويرها من أجل البروتينات سنة ١٩٦٥ على يد ف. سَنجر F. Sanger وب. إدمن P. Edman؛ ثمّ على يد أ. م. مكسم A. M. Maxam وف. أ. جيلبرت W. A. Gilbert اللذين طوّرا، سنة ١٩٧٧، طريقة كيميائية لقطع وتحليل الحموض النووية. استُعملت الآلة الأوتوماتية عام ١٩٨٥ لـ "قراءة" حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك على يد م. ف. هونكپيلر M. W. Hunkapiller ول. هود L. Hood، من شركة "أبلايد بيوسيستمز" (أي الأنظمة البيولوجية التطبيقية).

لم يعد ينقص سوى "آلات كتابة" للحياة، بمعنى آلات أوتوماتية تمكّن في البداية من تخليق بروتينات (وهو ما تم تحقيقه على يد مريفيد Merrified سنة ١٩٦٣ بواسطة آلته التخليقية)، ثم

بتخليق جينات قادرة على العمل داخل خلايا حيّة. ظهرت أولى **الآلات الجينيّة** سنة ١٩٨١ مع أعمال ك. إيتاكورا K. Itakura ول. هود. من ثمّ، غزت هذه الآلات مختبرات الهندسة الجينيّة حيث أصبحت اليوم ضرورية جداً.

فكُّ رموز المعلومة الجينية وقراءتها وكتابتها وحفظها ومعالجتها وفرزها وإعادة برمجتها. . .، تلك هي الوظائف المحدَّدة لمستقبل الحياة والتي أصبح البيولوجيون من الآن فصاعداً قادرين على تنفيذها. ويتحقق ذلك بالمساعدة الأكثر فأكثر فاعلية لعلوم الحاسوب. وبالفعل فهناك تكامل كبير بين الأدوات المعلوماتية وأدوات المختبر. وسنتعرّض له بواسطة أمثلة توضح منافذ البيولوجيا الحديثة والتكنولوجيا البيولوجية.

ليست الثورة البيولوجية فقط ثورة في معالجة المعلومة البيولوجية، فهي أيضاً ثورة في فهم رموز وذاكرات وشبكات وأنظمة الضبط التي تسمح بعمل الكائنات الحيّة. والخلية هي إذن آلة اتصال، مكوَّنة (كما لاحظنا) من جزيئات ضخمة حاملة للمعلومات وقادرة على "التعرّف إلى بعضها البعض" على نحو متبادل؛ أما الحموض النووية والبروتينات، في مرحلة أساسية، ودون أن ننسى تلك التي نتجاهلها دوماً، السكريّات (عديد السّكريد)، فهي تلعب مثلاً دوراً أساسياً في تعرّف الخلايا على بعضها البعض. وهذه حال الكريات الحمراء التي تحمل غشاءً "مشوّكاً" بسلاسل من عديد السّكريد، المحدِّد الرئيسي لفئات الدم. تُكتب المعلومة المحمولة بواسطة هذه الجزيئات الضخمة في شكل خَطيّ، مثل الحروف التي تُكوّن كلمات الجملة. لكن الطريقة التي تلتف بها هذه السلاسل في الفراغ تُكوّن أيضاً معلومة شاملة تسمح بالعديد من الاتصالات ما بين الجزيئات. إن إحدى أكبر مشاكل البيولوجيا الحديثة هو فهم كيف أن معلومة مكتوبة على شكل خَطيّ، مثل التي تُحمل بواسطة حَمْض

الديوكسي ريبونوكليك ، تُمكّن مع ذلك من تكوين كائنات حيّة ثلاثية الأبعاد (كالشجرة أو الزهرة أو الفيل أو الدلفين أو الفراشة أو الكائن البشري).

من دون الاتصالات تكون الحياة مستحيلة. يحدث تبادل إشارات التنظيم باستمرار داخل الخلايا وذلك لتأمين تنسيق عشرات الآلاف من التفاعلات الكيميائية الجارية. وتبدو الخلية بالمجهر الإلكتروني مثل مدينة نراها ونحن بالطائرة، مدينة بكامل شوارعها وتحويلات جسورها وتقاطعاتها. فالعناصر الأساسيّة لاتصال الخلايا هي **الشبكات والجزيئات ـ الإشارات والمستقبِلات**.

الشبكات هي قنوات مجهرية تعبر كل الخلية. تُنقَل الجزيئات المركّبة في مكان ما إلى المنطقة التي ستكون فيها نشِطة. وقد اكتشفنا حديثاً أن الجزيئات المُرسلة بهذه الطريقة تكون موسومة مسبقاً بـ"رمز بريدي" جزيئي يحدّد المكان الذي يجب أن تُرسل إليه.

تنقل المعلومات بواسطة الجزيئات ـ الإشارات التي تتعرّف إليها المستقبِلات. هذه الجزيئات، مثل الهرمونات، هي مرسال ورسالة في نفس الوقت. وفي الواقع، فإن شكلها يعتبر بحد ذاته معلومة. إنه الشكل الذي تتعرّف إليه المستقبِلة، بنفس الطريقة التي يتعرّف بها القفل إلى المفتاح.

أما المستقبلات التي توضع عموماً على غشاء الخلايا فهي جزيئات تابعة لبروتينات فيها تجاويف ذات شكل مكمِّل لشكل الجزيء ـ الاشارة الذي تعرفه. يأتي هذا الأخير ويندمج فيها، مُثبّتاً بروابط كيميائية ضعيفة، ثم يطلق إجابة المستقبِلة.

لقد توصل البيولوجيّون خلال بضع سنوات إلى اعتراض الإشارات التي تتبادلها الخلايا وفهم "ما تقوله" شيئاً فشيئاً. فمعلوماتها تصلح لجميع وظائف الحياة الأساسية، وخصوصاً للاتصال عن بعد (البيولوجيا العصبيّة، علم الهُرمونات)، وللتمايز

الخلوي عند تكوّن كائن حي (علم الأجّنة)، وكذلك لحشد الدفاعات عن الكائن العضوي في حالة العُدوان أو عند التخلص من الخلايا غير الطبيعية (علم المناعيّات). أما بالنسبة للخلية السرطانية فهي صمّاء إذا ما تعلّق الأمر بهذه المعلومات. فهي تُربك شبكة الاتصالات الحياتية.

المعركة ضدّ السرطان

قليلة هي المجالات في البيولوجيا التي توضح الاختراقات المحقّقة في السنوات الأخيرة أفضل من البحوث التي أجريت على السرطان. من المؤكد أنه ينبغي القيام بالكثير من أجل منع ورم ما من أن يتكاثر وعرقلة سير هذا المرض. لكننا نفهم بشكل أفضل تسلسل الأحداث الجزيئيّة التي تقود الخلية لتصبح سرطانيّة. ويعود جزء كبير من هذا التقدم إلى البحوث الأساسية التي أجريت في الخمسينات والستينات من القرن العشرين.

فعندما وضّح جاك مونو وفرنسوا جاكوب وأندريه لوف آليات التحكّم في تخليق البروتينات في الخلية (انظر ص ٩٨)، سألتهم وسائل الإعلام والعامّة عمّا إذا كان اكتشاف "مَشْغَل اللَكْتُوز" سيمكّن يوماً ما من "الشفاء من السرطان". رفضوا بالطبع إبداء رأيهم في سؤال مباشر كهذا. ومع ذلك، فبعد عشرين سنة، كانت أعمالهم قد تقدّمت خطوة لا بأس بها نحو فهم آليات تنظيم نمو الخلايا واضطرابها بواسطة "جينات السرطان" (مولّدات الورم *oncogènes*).

ماذا نعرف اليوم عن الظروف التي تحمل خلية عادية على أن تصبح سرطانية؟ تدعونا الإجابة عن هذا السؤال للنظر في عديد مجالات البيولوجيا الحديثة: البيولوجيا الجزيئيّة، والبيولوجيا الكيميائيّة، والبيولوجيا الفيزيائية، وعلم الوراثة، وعلم الفيروسات، وعلم المناعيّات، وعلم الغدد الصمّاء. هذا يثبت حاجتنا للقيام

بمقاربة متعدّدة الميادين. فلنحاول اختصار الخلاصات الأساسية للبيولوجيين. ولنبدأ بما نعرفه عن الالتئام *cicatrisation*.

عندما نجرح أنفسنا، تبتعد فجأة خلايا الجلد عن بعضها البعض. فهي لم تعد قط في اتصال مباشر. يثير هذا الحدث تخليق عامل النمو الخلوي، وهو مادة كيميائية (ببتيد في أغلب الأحيان) "تُعلم" الخلايا الواقعة على جهتي الجرح أن بإمكانها الانقسام من الآن فصاعداً. تتكاثر هذه الخلايا إلى أن تَردم "الحفرة" التي تسبَّب بها الجرح. إنه الالتئام. فعندما تعاود الخلايا الاتصال ببعضها البعض، فإنها تفرز عندئذ مادة تكبح تكاثرها. هذا شكل من أشكال التنظيم الآلي للولادات. إنه هذا "الكبح بالاتصال" الذي يجعل مجتمع الخلايا الحية لا يتكاثر إلا لإصلاح الأنسجة التالفة.

أما عن الخلايا السرطانية، فهي لا تستجيب لإشارات كبح التكاثر. إنها تعمل كخلايا تدمل جرحاً. . . لكنها لا تتوقف أبداً. تتكاثر الخلية السرطانية دون أن تستطيع الآليات العادية للتحكّم والتنظيم أن تتدخل في شؤونها.

وهناك أربع نقاط مهمة حول الالتئام لا بد من أن نأخذها بعين الاعتبار:

- عندما يُقطع كبح الاتصال (في حالة الجرح مثلاً)، تصنع الخلايا عوامل للنمو Growth Factors أو GF؛

- "تُعرف" عوامل النمو هذه بواسطة مستقبلات موضوعة على سطح الخلية. هكذا ترسل المستقبلات المحرَّضة في الخلايا إشارات قادرة على تحرير آليات الانقسام؛

- لا تُصنع عوامل النمو إلاّ في وقت محدد. ثمّ يتوقف تكاثرها، ولا تنقسم الخلايا أبداً؛

- لا تنقسم الخلايا سوى لمرات محددة طوال فترة حياتها (بين أربعين وخمسين مرة). ثمّ تموت بعد ذلك. أما الخلية السرطانية

فإنها "أبديّة"؛ وهي تتكاثر بعدد لا نهائي من المرات: ما دامت تجد ما تتغذى عليه، ومادام الكائن الذي يحميها على قيد الحياة.

على درب "الجينات السرطانية":

يبدو أن الخلايا العادية تتصرف حسب "طريقتين". فإما أن تكون "اجتماعية"، فتُمارس اختصاصاً ("وظيفة"، في مجتمع الخلايا)؛ بالتالي تتواصل فيما بينها وتخضع لكبح الاتصال ويتوقّف تكاثرها. وإما أن تكون "جَنينيّة"، غير متخصصة، وفي تكاثر نشط؛ وتكون بالتالي قادرة على التكاثر. تراقب بعض الجينات هذا التكاثر الجنيني الأساسي للحياة. إثر ذلك، "تنام" عندما تصبح الخلايا بالغة. ويبدو أن الخلية السرطانية هي خلية جنينية "تستيقظ" بغتة، وهي بالتالي مزودة بقدرتها على التكاثر الأساسي للحياة. ولكنها تغدو من الآن فصاعداً خلية ليست قابلة للضبط. الخلية السرطانية هي خلية "غير اجتماعية" لا تمتثل لأيٍّ من أوامر المُجتمع الذي تعيش فيه.

ما الذي يحمل خلية عادية على مخالفة جميع قوانين الحياة في "المجتمع الخلوي"؟

منذ بضع سنوات، اكتشف البيولوجيون "جينات السرطان"، أو "مولِّدات الورم". توجد هذه الجينات في الخلايا العادية (نسميها إذن مولِّدات الورم الأولية *proto - oncogènes* وفي مجين *génome* الفيروسات المُسرطِنَة. وقد أحصينا إلى اليوم قرابة ٥٠ جيناً ورمياً، منها حوالى ثلاثين في الخلايا. يوجد بعضها في النواة والبعض الآخر في السيتوبلازما. تحمل الجينات الورَميّة المعلومة الجينيّة "المَرْموزة" التابعة لبعض البروتينات والتي باتت اليوم تحدَّد بشكل جيد. والسؤال جوهري هو: كيف يمكن للجينات الورميّة وللبروتينات التي ترمزها التحوّل من خلية عادية إلى خلية سرطانية؟

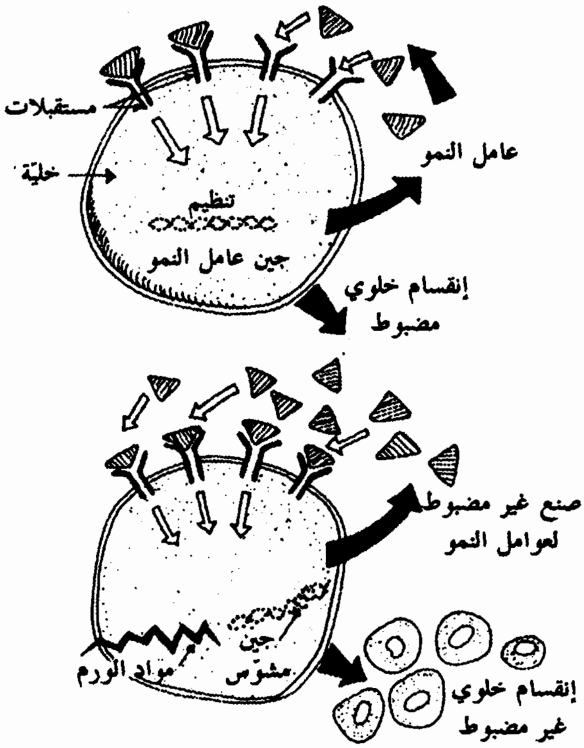
هناك العديد من الأجوبة. وجميعها ناتج عن جهد مدهش للبحث على الصعيد العالمي. فالجينات الورميّة، هدف الباحثين،

تحمل أسماء غريبة مثل *myc*، *ras* أو *erb*. والفيروسات المتّهمة هي الفيروس المفجّي SV40، أو التورام، والفيروس الغذّي، وحتى فيروس التهاب الكبد البائي. ويبدو أنه عند حدوث عدوى فيروسيّة، تندمج الجينات الورَميّة المحمولة بواسطة الفيروس في حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك الخاص بالخلية العادية بجانب الجينات الورميّة البدائيّة التي تتولى القيادة. تلعب الجينات الورميّة الأولية دوراً أساسياً في تنظيم إنقسام الخلايا العادية ونموها. لكن الجينات الورميّة الفيروسيّة تخلّ بنظام هذه الآليات التي تفلت، بالتالي، من كل نظام.

في عام ١٩٨٣ كان راسل ف. دوليتل Russel F. Doolittle، الباحث في جامعة كاليفورنيا بسان دياغو يبحث في الحاسوب عن التشابهات الممكنة بين متواليات الجينات الورميّة الفيروسيّة ومتواليات رامزِة لعوامل النمو. واكتشف، بشكل مدهش، تشابهاً كبيراً بين متوالية عامل مشترِك في التئام الجراح (عامل نمو مشتقّ من الصفيحات *Platelet Derived Growth Factor* أو PDGF) وبين متوالية فيروس يتسبّب بالسرطان لدى القرد أو الدجاجة. ولأول مرة حدثت صلة بين مادة أساسية للحياة وموجودة في الخلايا وبين جين ورمي فيروسي. هكذا، يمكن لخطأ بسيط في الترميز أن يولّد إشارة تسيء الخلية تفسيرها، باعطائها أمراً بالتكاثر مع أنها لا تحتاجه بأي شكل من الأشكال.

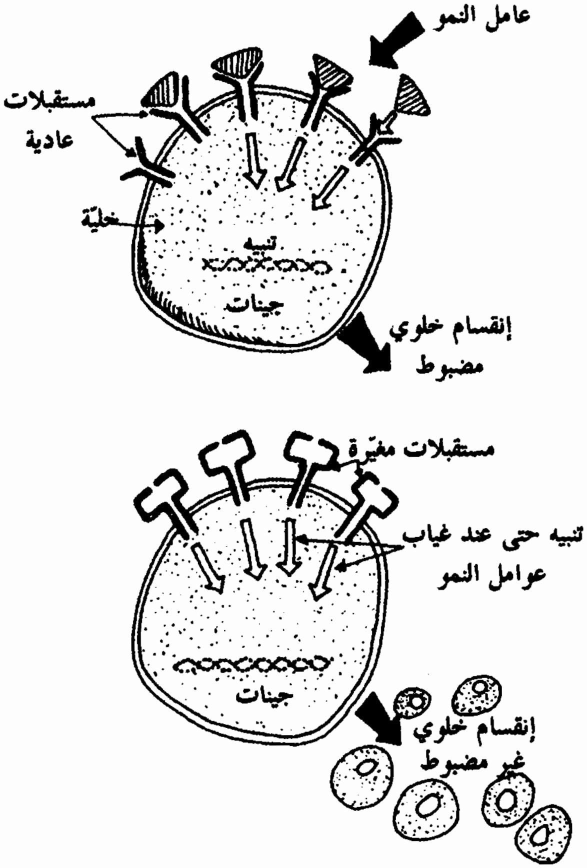
نستطيع الآن تلخيص فرضيات التَسرطن على المستوى الجزيئي. مع التشديد على هذا التحفظ الهام: لا يمثّل دور الجينات الورميّة (المرتبط دوماً بعوامل أخرى متأتّية من المحيط، مثل العوامل المُطفّرة) سوى المرحلة الأولى من التَسرطن؛ وذلك على المستوى الجزيئي والخلوي. ولا نعرف جيداً السيرورة اللاحقة لانتشار الأورام في **المكان الحيّ**. ولذلك سنركّز هنا على ما نعرفه عن المراحل

الأولية للتّسرطن. يبدأ كل شيء، على الأرجح، على مستوى خلية واحدة. وهناك ثلاث فرضيات أساسية مقترحة اليوم من الباحثين. إذ يمكن لتشوّش آليات التنظيم أن يؤثر في **الاشارة**، أو **المستقبِلة** أو **المادّة الناقلة**.

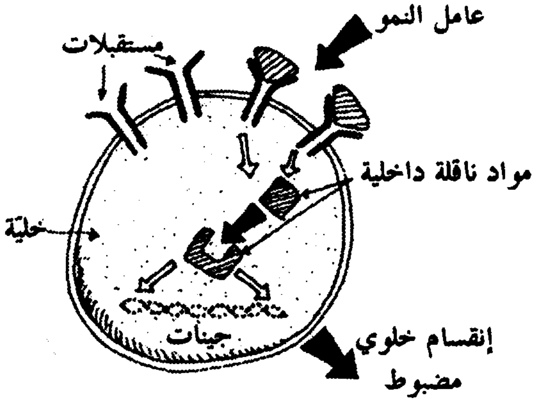


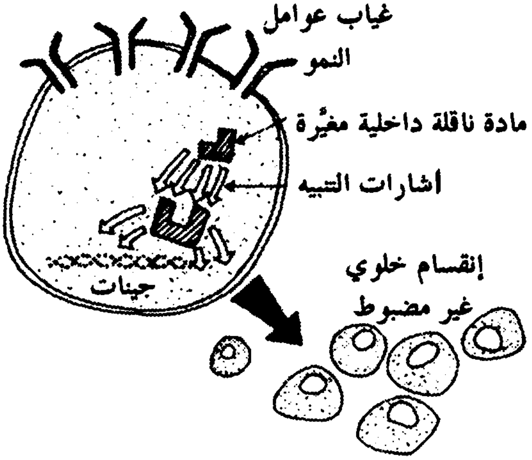
رأينا أن الإشارة الخلويّة التي تتحكّم في آليات الانقسام الخلوي تعتبر عاملاً للنمو. تتكاثر الخلايا الجنينيّة إذا كان عامل النمو موجوداً في الوسط. أما الخلايا الورميّة، فقد تكتسب استقلالية تامة أو جزئية

إزاء هذا العامل. في عام ١٩٨٠، اقترح ج. ج. تودارو G. J. Todaro وم. ب. سبورن M. B. Sporn، آليّة التنبيه الذاتي الخلوي، ومفادها أنه إثر إدخال جين ورمي أو تغيّر الجين الورمي الأولي، يفلت، تدريجياً، صنع عامل النمو بواسطة خلية ورميّة عن كل مراقبة. تُنبِّه المستقبلات المحمولة بواسطة نفس هذه الخلية باستمرار وتصنع الخلية أيضاً مزيداً من عوامل النمو. من ذلك، تنشأ حلقة للمفعول الرجعي الإيجابي.



من الطبيعي أن تكتشف المستقبِلات البروتينية الموضوعة على سطح الخلايا وجود عامل النمو وأن تنبّه الآليات الداخلية للانقسام. فإن تعرضت هذه المستقبلات لنوع من التغير ـ إثر تغيير الجين الذي يرمز مثلاً إلى مخططات صنعها ـ فبإمكانها أن تصبح شديدة الحساسية





وتكتشف وجود عوامل النمو رغم أن الوسط الموجودة فيه خال. وهكذا ترسل المستقبلة للخلية، باستمرار، إشارات لتنبيه النمو، فتصبح هذه الخلية سرطانية.

تُفكّ رموز المعلومات المرسلة بواسطة المستقبِلات عن طريق المواد الناقلة الداخلية، وهي جزيئات تلعب دور عامل الترابط بين المستقبِلات والآليات الخلوية للانقسام. تتحرك هذه المواد الناقلة، دوماً، على مستوى حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك. ومع ذلك يمكن أن تتغير وتبعث باشارات انقسام حتى في غياب التنبيه المتأتي من المستقبِلات. مرة أخرى، ستفلت الخلية من كل مراقبة وتبدأ بالتكاثر إلى ما لا نهاية.

تحالف عالمي:

يدور حالياً صراعٌ مذهلٌ ضد السرطان في مئات المختبرات المنتشرة في العالم. وهذا الصراع يمثّل رهاناً هاماً على الصعيد العالمي، سواء بالنسبة للصناعة الصيدلانية أو بالنسبة لهيبة الدول الصناعية الكبرى التي تعهدت به. إن المعرفة الملمّة بالآليات الجزيئية لإثارة السرطان يجب أن تمكننا، في السنوات القادمة، من إيجاد الوسائل العلاجية الملائمة. ومع ذلك ينبغي أخذ الحيطة والحذر. ولا يمكننا، خاصّة عندما يتعلق الأمر بالسرطان، أن نظهر آمالاً وهمية باعطاء انطباع يوحي بوجود علاج أعجوبي. ومما لا شك فيه أن الطرق الجديدة الموصوفة هنا لن تؤدي إلى تشخيص أو علاجات ناجعة إلا بعد سنوات عديدة. ولهذا فمن المهم التذكير بالنقاط الخمس التالية:

- يجب أن لا نتكلم عن **نوع واحد** من السرطان وإنما عن **عدة أنواع** منه. العديد منها موجود حالياً بأشكال مختلفة (سرطان الرئة والثدي والكبد والعظام والجلد والدم...)؛

- لا تنتج السرطانات عن **سبب معيّن**، بل عن العديد من **الأسباب المترابطة** المرتّبة زمنياً، تتضافر فيها جهود علم الوراثة

والميدان وطريقة العيش. إن سيرورات التسرطن يمكن أن تتواصل على مدى عشر سنوات أو عشرين أو حتى ثلاثين سنة؛

- لا تحدث السرطانات فجأة **خلال مرحلة واحدة، بل في مراحل متعاقبة** لا تقود أولاها بالضرورة إلى ظهور السرطان. تُتْلف الخلايا السرطانية في جسمنا يومياً بالتأكيد، بواسطة أجهزة دفاعنا الطبيعية؛

- لا يوجد علاج ضد السرطان، ولكن توجد **مجموعة من الوسائل العلاجية** (جراحة، علاج بالأشعة، علاج كيميائي، معالجة مناعيّة...) وتضاف إليها الوقاية والكشف النِظَامي للأمراض؛

- يشفي الطب اليوم حالة من كل ثلاث حالات من السرطان. ويزداد عدد الموتى بالسرطان، من ناحية لأننا نعيش حياة طويلة وأيضاً بسبب أشكال تعود لطرق عيشنا (التدخين والعادات الغذائية والمخاطر المهنية...).

لا يمكن أذن أن تكون وسائل التصرّف سوى شاملة ومترابطة، تتضافر فيها أمور الوقاية وكشف الأمراض والمعالجة.

نحن نعلم منذ الآن أن بإمكان الجينات الورميّة أن تكون "منشَّطة" بواسطة مواد كيميائية. وبالتالي هناك طريقة للوقاية من بعض السرطانات تتمثّل في اكتشاف المواد المُسرطنة بأسرع وقت ممكن. إننا نعرف قرابة ٦ ملايين من المواد الكيميائيّة. ونحن معرضّون بانتظام إلى أكثر من ٦٠ ٠٠٠ منها (مبيدات الحشرات، مضافات الأطعمة، مواد التجميل، الأدوية، الديوكسين، البيرالين...). لكن معظمها لم يجرِ اختبارها لمعرفة تأثيرها الاحتمالي المسرطِن، ويعود ذلك خاصة للكلفة الباهظة لتلك الاختبارات. فقط بعض المئات منها تظهر على اللائحة السوداء للمنظمات المتخصصة.

ولحسن الحظ، تسعى التكنولوجيا الحديثة إلى بعث الأمل في كشف متطور للمرض. ويمكن للمعلوماتيات مثلاً أن تساعد في التنبؤ

بالقدرة المُسرطِنة لمادة معينة انطلاقاً من بنيتها الكيميائية، وأن تربط بين عائلات المواد الخطرة. لقد تم تغيير عدة أنواع من البكتيريا بواسطة تقنيات الهندسة الوراثية لتصبح سريعة التأثر بالطفور. وتعتبر اليوم أساساً للاختبار (اختبار آيمز Ames) الذي يمكّن من اكتشاف المواد المسرطنة. كما أن المصانع الكيميائية والصيدلانية الكبرى قد باشرت بإخضاع منتجاتها الجديدة بشكل رتيب إلى تجارب من هذا النوع.

كذلك تطوّرت تقنيات الاكتشاف المبكر للسرطان. وقد جاءت النتائج المأخوذة بفضل المفراس scanner والرنين المغناطيسي RMN مذهلة. كما ابتكرت اختبارات للتشخيص المبكِّر في العديد من المختبرات. وقد استندت هذه الاختبارات إلى خصائص الجزيئات البيولوجية في التعرّف على بعضها البعض بتحديد دقيق وفي التعلّق ببعض "الواسمات" marqueurs التي تميّز الخلايا السرطانية. وهكذا تمكّن عدد من الباحثين البريطانيين، سنة ١٩٨٧، من إثبات أن سرطان القولون يمكن أن يكون نتيجة لغياب شدفة الجين على زوجي الصبغي رقم ٥. وسيمكّن هذا النوع من التقنيات من البدء بعلاج ملائم في وقت مبكّر بالقدر الكافي ومن التوصية ببعض التغييرات فيما يتعلق بالعادات الغذائية أو طرق العيش.

لمقاومة السرطان بفعالية، يستخدم الباحثون في السرطان أكثر فأكثر "المعالجة الحيويّة" إلى جانب الوسائل الكلاسيكية (الجراحة، العلاج بالأشعة، العلاج الكيميائي). يتعلّق الأمر بمحوّرات الاستجابة البيولوجية (المحوّرات البيولوجية *biomodulateurs*) مثل الأنترفيرون أو الإنترلوكين أو "القتلة الطبيعيّين" للأورام، مثل TNF. هذه المواد الطبيعية التي نحصل عليها اليوم بواسطة الهندسة الوراثية تُمكّن من التصرف بطريقة محدّدة أكثر من ذي قبل، وذلك مثلاً بتنبيه أجهزة الدفاع الطبيعية للجسم أو بقتل الخلايا المصابة موضِعياً.

وهكذا، فإن البيولوجيا الجزيئية الأساسية تسمح اليوم بمسك السرطان "بملقط" (كما لو كان بين ملقطي السرطان الذي يرمز إليه)؛ بفضل التطورات الحاصلة في مجال البحث حول مولدات الأورام، وحول إدراك بعض الآليات التي "توقظه"، وحول دور المحوّرات البيولوجية، ولكن أيضاً بانحراف ذكي في استعمال الهندسة الوراثية وعلم المناعيّات: وهما مجالات حاسمان، كما سنرى لاحقاً، في مستقبل الحياة. قبل نهاية التسعينات، ستُستثمر أدوية ناجعة ضد بعض أنواع السرطان. كذلك، ستُستعمل اللقاحات المضادة للسرطان والتي حرّضت الفيروسات بعضها. لذلك فالحرب الكبيرة والجديدة التي ستُشن ستتعلق بسيرورة التقدم في السّن ذاتها: أحد أكبر تحديات البيولوجيا لبداية القرن الحادي والعشرين.

ـ ٢ ـ

أدوات الثورة البيولوجيّة

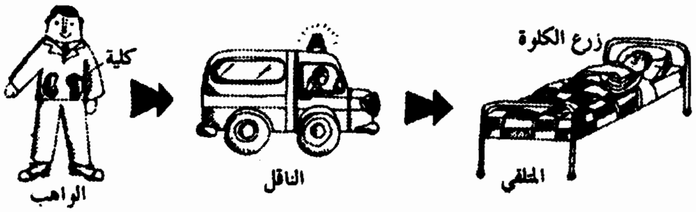
سحرة الجينات

يقول فرنسوا جاكوب في كتابه الجميل جداً **منطق الكائن الحي** إن "حلم" الخلية هو الانقسام. ولطالما كان الحلم السرّي للبيولوجيين هو إعادة برمجة الحياة. وهذا الحلم اليوم ليس فقط ممكناً بفضل الهندسة الجينية ولكنه أيضاً أساس الصناعة المتطورة.

وكما نعلم، فالبرنامج هو أحد أسس عمل الحواسيب. وبفضل برامج مختلفة يمكن أن "نلقّن" حاسوباً وظائف شتى مثل: التحكم في مصنع، وإطلاق صاروخ، وتحضير جدول الرواتب في مؤسسة، وتلحين الموسيقى، ورسم الخرائط الهندسية للمنازل، والاتصال بحاسوب آخر عبر الشبكة الهاتفية. لكن، كيف سيكون الوضع إذا ما وجب استعمال حاسوب مختلف لكل مهمّة؟ إن بطء المعلوماتيات يجعل تحقيق أهم الأنشطة التقنية والصناعية والاقتصادية في المجتمع أمراً مستحيلاً. ونجد ما يشابه هذه الحالة في صناعة المواد الغذائية الزراعية والمواد الصيدلانية قبل الهندسة الوراثية. هناك، تُستعمل الأحياء المجهرية لمهام معينة مثل: استعمال ذرّية من **العصيات المُلبّنة** لتخمير الحليب وتحضير الجبن وذرية أخرى لتحضير الخل أو البيرة أو الخمر، أو لضمان حفظ السُجُق. كذلك، تُستعمل الخميرة لتحضير العجين الذي يُصنع منه الخبز، ويُستعمل العفن في إنتاج المضادات الحيوية... حالياً، تسمح الهندسة الجينيّة بتغيير البرنامج

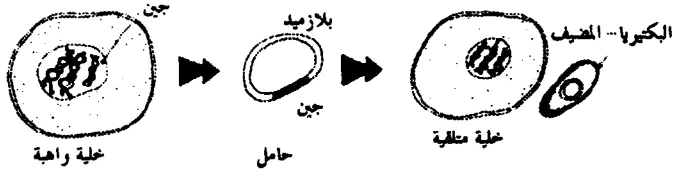
الوراثي للكائن المجهري (بكتيريا أو خميرة) أو لخلايا أكثر تعقيداً كالخلايا الحيوانية أو النباتية. لكنها تجعلها تنتج المواد المطلوبة. وهكذا يمكن لبعض أنواع البكتيريا مثل **الإشريكِيّةُ القُولُونِيّة** (انظر ص ٣٦) أو **العَصَوِيّة**، أو بكتيريا من جنس **الزَّائِفَةُ** *Pseudomons* أن تتحوّل إلى "مصانع مجهريّة" مُبرمَجة قادرة على الصنع غير المحدود للأنسولين أو الإنترفيرون أو النِيلَج أو حتى الحرير!

لإعادة برمجة الحياة يجب أن نكون قادرين على تحقيق نوع من "الزرع" على المستوى الجزيئي، وذلك بإدخال جزء من البرنامج الجيني الغريب في جزء من الخليّة المتلقية. في الزرع الكلاسيكي، (زرع الكلوة مثلاً) توجد ثلاثة عوامل رئيسية: الواهب والناقل والمتلقّي.



تتكرر مثل هذه الصورة في "الزرع الجزيئي" الذي تحقّقه تقنيات الهندسة الجينية. يكون الواهب هو الخلية التي منها عُزل ونُقي واستخرج ونسخ وخلق كامل الجين أو الجزء المُراد "زرعه" في خلية أخرى. مثال ذلك، جين هرمون نمو الإنسان، أو جين الأنسولين، أو جين العامل VIII (مادة طبيعية تُستعمل لعلاج الناعور)، أو جين الإِنْتَرْلوكين (مادّة تُستعمل في علاج بعض حالات السرطان). يُعرف الناقل باسم "الحامل": وهو عبارة عن "حصان طروادة" حقيقي جزيئي يسمح بإدخال الجين الغريب داخل الخلية المُتلقية (الاستنساخ clonage). ولذلك فإننا نستعمل سلاسل قصيرة من حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك الدائري، البلازميدات *plasmides*.

توجد هذه الأخيرة في البكتيريا، لكن البيولوجيين يحولونها لجعلها أكثر فاعلية وأفضل قابلية للمراقبة. أخيراً، يكون المتلقّي، الذي سوف يُحوّل لاحقاً إلى مصنع مجهري مُبرمج، عبارة إما عن بكتيريا (الإِشْرِيكِيَّةُ القُوْلُونِيَّة أو العَصَوِيّة) أو خميرة أو خلية مستزرعة (خلية فأر أو قرد أو حيوان آخر) قادرة على "التعبير" عن الجين أي السماح له بتوجيه تخليق البروتين المطلوب.



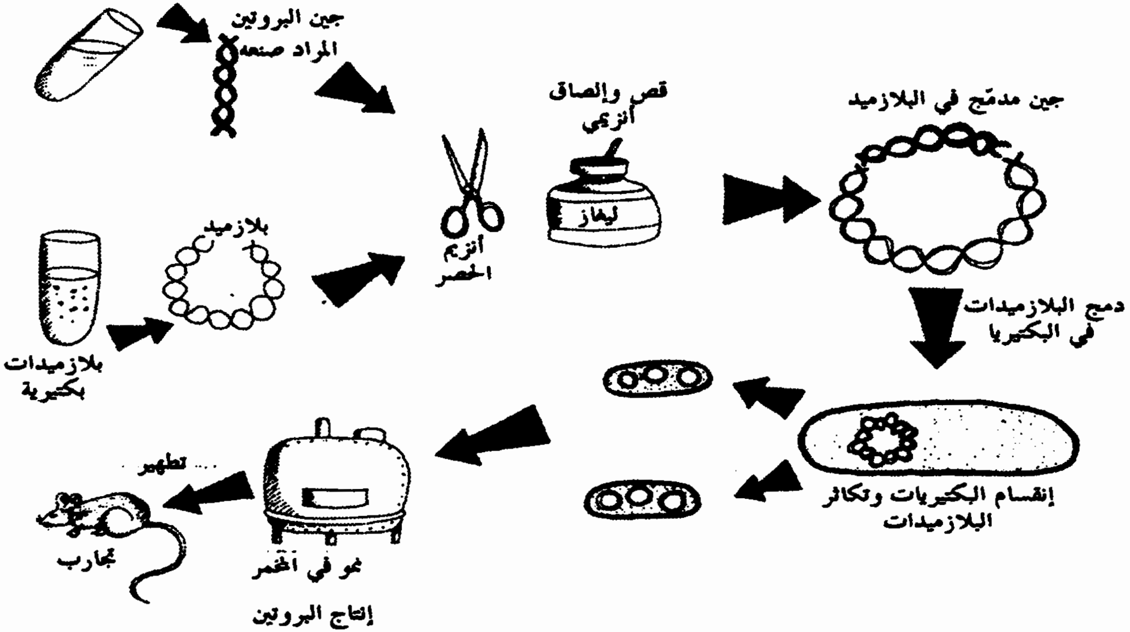
تُعتبر مصطلحات **الحامل والاستنساخ والتعبير** الكلمات الرئيسية في الهندسة الجينية. ولتحقيق عمليات "الجراحة المجهرية الجزيئية" هذه، ينبغي أن تتوفر للبيولوجيين أدوات مصغّرة جداً ذات أداء عالٍ جداً جرى تطويرها خلال مآثر الهندسة الجينية. هذه الأدوات هي بالأساس أنزيمات، وهي عبارة عن آلات جزيئية تُستعمل في قصّ وتجميع ومحو وإعادة إنتاج ونقل مُتواليات الأوامر الكيميائية التي تكوّن لغات الحياة. وبفضل أعمال و. أربر W. Arber، الحائز على جائزة نوبل، تمكّن مهندسو الجينات تدريجياً من ضبط تشكيلات من الأنزيمات في سبيل قصّها وإلصاقها. ونحصي من هذه الأنزيمات اليوم أكثر من مائة تحمل الأسماء المرمزة Hind III أو Bam H1 أو EcoR1 أو Pst1 والتي تمكّن من قصّ حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك في أمكنة معينة وإلى أجزاء معروفة. يسمح هذا العمل بتحليلها وتخزينها أو تجميعها في الحاسوب. وتساعد بعض الأنزيمات الأخرى مثل الليغاز في إلصاق أجزاء البرامج الجينية فيما بينها لتكوين مُتواليات تحمل أوامر محددة. أخيراً، تسمح آلات أوتوماتية بتخليق

جينات اصطناعية سوف يتم التعرّف إليها و"قراءتها" من قبل مصنع الخلايا كما لو كانت جينات طبيعية.

إن القدرة الخارقة على تخفيف سرعة المعلومة البيولوجية، أخذاً بالاعتبار سرعة إنتاج البكتيريا، تسمح بمرور تقنيات المختبر إلى المصنع. فخلال مدة تتجاوز ٣ ساعات بقليل، تصبح أعداد بكتيريا الإِشْرِيكِيَّةُ القُوْلُوْنِيّة (تنقسم كل عشرين دقيقة) مضروبة في ١٠٠٠، وبشكل أكثر تحديداً في ١٠٢٤: هنالك في الواقع ٣ انقسامات في الساعة، وبالتالي ١٠ انقسامات في ٣ ساعات و٢٠ دقيقة؛ ما يعطي ٢ ^{١٠} = ١٠٢٤. وبحسب وسط الزرع الذي يتضمن بضع عشرات أو بضع آلاف من البكتيريا، يمكن إذن أن نصل في غضون ساعات إلى مُخمّرٍ بسعة ١٠٠٠٠٠ لتر.

يعرض الرسم اللاحق سيرورة صنع مادة ما، مثل الأنسولين أو هرمون النمو أو الإنترفيرون، بواسطة التقنيات العصرية للهندسة الجينية (الوراثية).

ومنذ ذلك الحين ساهم تقدّم الهندسة الجينية في ولادة الصناعة الجينيّة كونها الأساس الحيوي للتقنيات البيولوجية. لكن الهندسة الجينية لا تقتصر فقط على ميدان الصيدلة، بل إنها تتجاوز هذا الميدان لتساعد في ابتكار أنواع جديدة من النباتات، وصناعة المبيدات البيولوجية، ومعالجة العيوب الجينية، وتكوين أنواع جديدة من الحيوانات أو بَلْمَرات بَيولوجية للاستعمال الصناعي. والهندسة الجينية التي كانت مجرد أداة مخبرية سنة ١٩٧٥، لم تكتف فقط بالقيام بثورة في الصناعات الكيميائية والبيولوجية والصيدلانية والغذائية الزراعية، بل مهدت السبيل أيضاً لفهم ومعالجة بعض الأمراض كالسرطان وفقدان المناعة.



تجربة في الهندسة الوراثية

الحلفاء غير المرئيين

بعود الفضل في تقدم البيولوجيا الأساسية، وكذلك التكنولوجيا البيولوجية بنسبة كبيرة إلى الأدوات الجزيئية ذات الفاعلية الكبرى: أي الأنزيمات بالدرجة الأولى (الآلات الجزيئية)، وكذلك الأضداد أُحادِيةُ النَّسِيْلَة (رؤوس باحثة جزيئية)، ومسابير التهجين (أدوات فرز جزيئات حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك) والواسمات المُشعّة أو الأنزيميّة (علامات ملتصقة بالجزيئات التي نود تتبع أثرها).

هذه الأدوات التي يستعملها البيولوجيّون في التقطيع، والتجميع، والفرز، والتوسيم تستند إلى خاصية تعرّف الجزيئات إلى بعضها البعض: البروتينات إلى البروتينات الأخرى، والحموض النووية إلى بروتينات أو أجزاء من الحمض النووي إلى أجزاء من الحمض نفسه. تكون أشكال مواضع التعرف التابعة لهذه الجزيئات مكمّلة. بذلك تنشأ روابط بين المجموعات الكيميائية الموضوعة على مسافة معقولة. ويكون كل واحد من الروابط ضعيفاً، ولكن عددها الكبير يحافظ على اتصال الجزيئات ببعضها البعض، وذلك بشكل مشابه قليلاً لشريطي ڤيلكرو يتقربان الواحد من الآخر. من بين هذه الأدوات الجزيئية، ثمة اثنان يلعبان دوراً حاسماً في اختراقات البيولوجيا والتقنيات البيولوجية، وهما: الأضداد أحاديّة النسيلة ومسابير التهجين الجزيئيّة. إنها أدوات مساعدة غير مرئية،

لمفاوية

أضداد

بلاعم

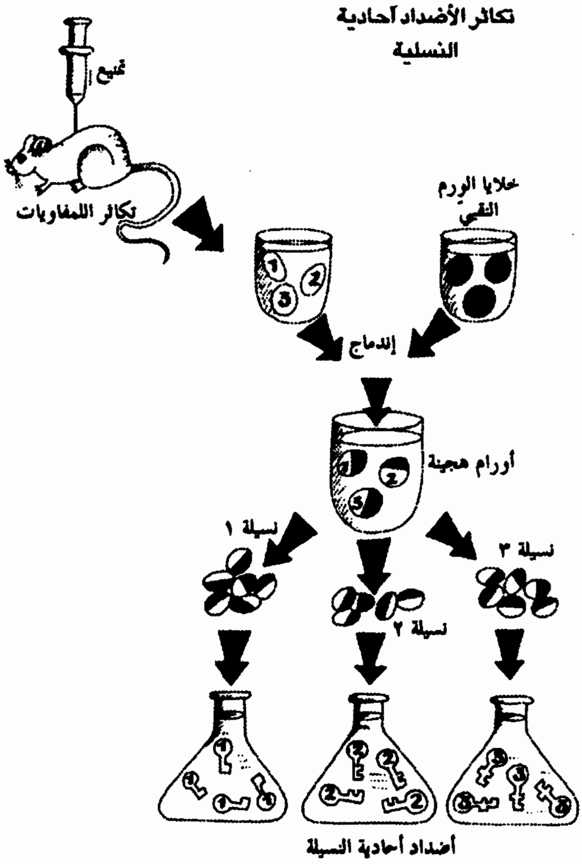
جليدة ويمكن الوثوق بها، تقتفي، وسط الخلايا، آثار البِنى أو الجزيئات التي يريد البيولوجيون تعيينها أوعزلها.

اكتُشفت الجزيئات أحادية النسيلة سنة ١٩٧٥ على يد ج. كوهلر G. Kohler وس. ميلستاين C. Milstein في كامبردج (بإنكلترا). لكن هذين الباحثين الأساسيين لم يفكرا في تسجيل اختراعهما الذي سوف يرتكز عليه، فيما بعد، تطوّر العديد من المؤسسات البيولوجية التقنية.

والأضداد هي عبارة عن بروتينات (الغلُوبولينات المَناعِيّة) تُنتَجها بكمية كبيرة في الدم الكريات البيض (اللِّمْفاوِيّاتُ البائِيّة). فعندما يُمنَّع حيوان بواسطة المستضدّ *antigène* (بروتين أو جزيء ضخم آخر مميّز للفيروس أو البكتيريا على سبيل المثال)، تتوطّن الأضداد على المستضدّات وتعطلها. عندئذ تتمكن البلاعم (عوامل تنظيف الكائن)، من بلعمتها. وكان كل من كوهلر وميلستاين قد حاولا الحصول على أضداد خاصة للمستضد عن طريق زرع اللمفاويّات البائية في **المختبر** (خارج الكائن الحي).

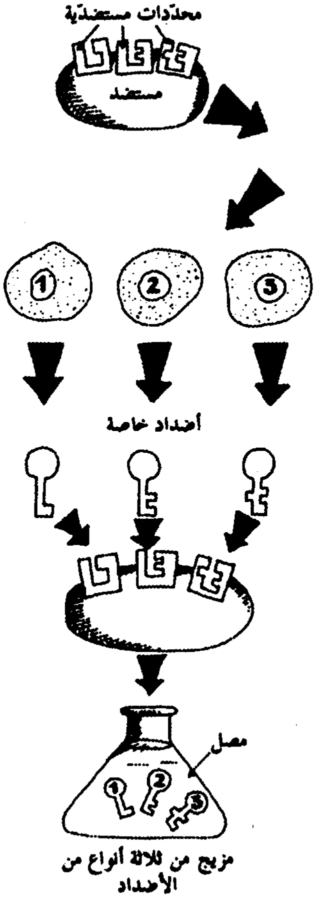
لكن للأسف لا تتطور اللمفاويات في مثل هذه الظروف. في المقابل، "تتلاقى" خلايا سرطانية لورم نقييّ (سرطان النقي) وتتكاثر في المختبر. إنها خلايا دائمة. فلماذا لا نجرّب دمج وتهجين هذين النوعين من الخلايا للانتفاع بقدرة اللمفاويات البائيّة على إنتاج الأضداد والاستفادة من خصائص زرع خلايا الورم النقييّ في **المختبر**؟ هذا ما سعى إليه كوهلر وميلستاين بانتاجهما لأورام هجينة وخلايا هجينة لها نفس خصائص الخليتين المندمجتين. وبهذا الصدد تبيّن أن هنالك إيجابية إضافية: إذ يصبح بالإمكان تحديد نسائل (جمهرة متحدّرة من نفس الخلية) الورم الهجين ومن ثم فرزها، بحيث تصنع كل واحدة منها نوعاً واحداً وخاصاً جداً من الأضداد يُسمى ضدّاً أحادي النسيلة (أي سليل نسيلة واحدة). ومن الآن

فصاعداً نحصل أبداً في مصل الحيوان المُمنّع، في المجموعات وفي المزيج، على أضداد مختلفة متجهة نحو العديد من العناصر الخاصة بالبروتين المستضدّي. لكن، يمكننا بهذه الطريقة عزل أضداد أحادية النسيلة متجهة نحو عنصر واحد (حاتِمَة *épitope*) لا غير: كما لو أنه عوضاً عن أن يتعرف جهاز الكشف على المجموعة التي يتكوّن منها الوجه، يلجأ إلى التعرف إلى زاوية العين أو غضنة الوجنة أو شكل الأذن.



هذا ويوضّح الرسم أدناه إنتاج الأضداد أحادية النسيلة.

نفهم إذن لأي سبب تمثّل الأضداد أحادية النسيلة أدوات خارقة للتشريح الجزيئي. ويمكننا في الواقع تعليق "لُصاقات" ضخمة (معادن ثقيلة، نَظائرُ مُشِعّة، أنزيمات) على هذه الرؤوس الباحثة مُحدثين تفاعلاً لونياً - توسيماً مناعياً أنزيمياً - لتعيين مكان الجزيئات حَيويَّة المَنْشَأ وفرزها وعزلها.



وللأضداد أحاديّة النسيلة تطبيقات عديدة. ففي مجال التشخيص، تسمح هذه الأضداد مثلاً بالكشف، داخل الكائن الحيّ، عن وجود فيروس (الْتِهابُ الكَبِدِ البائيّ، أو الهربس، أو فقدان المناعة) أو بكتيريا مسؤولة عن الأمراض المنقولة جنسياً، أو خلايا ورميّة (سرطان الثدي، أو القولون أو المبيض). فإذا ما اقترنت هذه الأضداد بالذيفان الفعّال، فإنها تُجيز إبادة الخلايا المريضة (ذيفان مناعي)، على نحو انتقائي. ويمكننا زرعها لاحتلال مكان العامل المُعدي، على المُستقبلة الخلويّة التابعة له، وغلق باب دخول الخلايا فيه. أما لفصل وعزل البروتينات، فيمكن شدّ الأضداد أحاديّة النسيلة إلى دعائم من البلاستيك موضوعة داخل أعمدة زجاجية و"مسك" الجزيئات

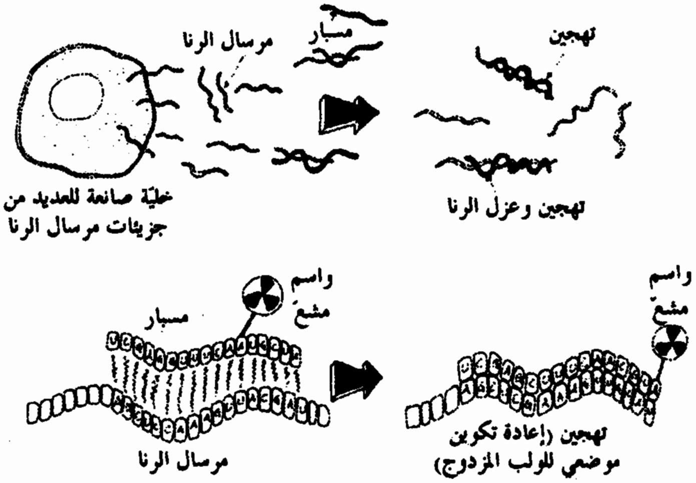
المنشودة عند العبور (اسْتِشْرابٌ بالأُلْفَةِ). هذه الأضداد أيضاً هي عبارة عن حراس ينبّهون لرفض الزرع في الوقت المناسب.

وعلاوة على فائدتها الكبيرة في البحث الأساسي، فإن الأضداد أحادية النسيلة هي اليوم في قلب صناعة رائجة. ومن المقدر أنّ ثلث مؤسسات التقانة البيولوجية في العالم تسوّق منتجاتٍ أساسها الأضداد أحادية النسيلة. وقد حاز كل من كوهلر وميلستاين على جائزة نوبل نظراً لأهمية اكتشافهما. كما أنّ المسؤولين البريطانيين المُكلّفين بتقييم البحوث يأسفون بمرارة لعدم حصولهم، في الوقت المناسب، على براءة اختراع حول بحوثهم في هذه الخلايا الهجينة والغريبة، المسمّاة بالأورام الهجينة *hybridomes*.

تمثّل مسابير التهجين هي أيضا ثورة أخرى. فبدونها، تغدو أغلب الاكتشافات المعاصرة حول جينات الأورام (جينات السرطان) مستحيلة. تستند هذه المسابير إلى خاصيّة الحموض النووية في تشكيل لولب مزدوج انطلاقاً من خيطين مبسوطين لكنهما يحظيان بمتواليات متممة. إذا وُجد خيط حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك معزولاً، تلتف قطعة قصيرة تشتمل على القواعد المكملة (مسبار) حوله، تماماً في المكان المنتظر. إنها ظاهرة التهجين الجزيئي. وإذا وصلنا هذا المسبار بنظير مُشعّ أو بأنزيم يمكننا وسم (أي كشف وفرز وعزل) متواليات الجينات الحاملة لمعلومات مرموزة تميز بروتيناً أو فيروساً أو عيباً جينياً أو جيناً ورمياً *oncogène*.

يستطيع البيولوجيون أيضاً عزل مرسال الرنا الموافق للبروتين المنشود ونسخ خيط الرنا الأحادي هذا إلى خيط مزدوج متمّم من حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك، وذلك بفضل أنزيم يُسمّى بالمُنْتَسِخَةُ العَكْسِيَّة *transcriptase reverse*. بعد ذلك، سيُستنسخ حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك في خليّة مُضيفة بواسطة تقنيات الهندسة الجينية سعياً لإنتاج كمية هائلة من البروتين. هذا العزل انطلاقاً من

الملايين من جزيئات الرنا المختلفة يتم بواسطة مسابير الجزيئات كما يُظهره الرسم اللاحق.



تكون مجموعة المعلومات الجينيّة لدى الفرد، والتي يحويها حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك، مشابهة لبنوك المعلومات الحاسوبية. ولكي نبحث اليوم عن جميع المقالات التي تتضمن كلمة "تقانة حيوية" أو "إنترفيرون"، يكفي أن نكتب هذه "الكلمة المفتاح" على لوحة ملامس الحاسوب حتى يتولى هذا الأخير البحث في ذاكرته عن جميع متواليات الكلمات والجمل التي تتعاقب حروفها حسب نفس ترتيب حروف الكلمة المفتاح؛ ثم يعرض العدد أو العناوين أو النصوص الكاملة للمراجع المختارة.

يعتبر مسبار التهجين نوعاً من "الكلمة المفتاح الجزيئية". فإذا وضع هذا المسبار في بنك الجينات، بين مئات الملايين من المتواليات والمليارات من الحروف المكوّنة للرمز الجيني، فسوف يعثر على المتوالية المتممة، ويتهجّن منها ويسمح، بفضل عملية الوسم، بعزلها أو التعرف إليها.

قبل وضع هذه المسابير موضع الاستخدام، كان البحث عن جين بشري يحتوي على معلومة عن بروتين بـ١٠٠٠ حمض أميني يعني البحث عن صفحة من نصّ (لنفرض ٣٠٠٠ حرف نظراً إلى أننا بحاجة إلى ٣ حروف من الرمز الجيني لتعريف الحمض الأميني) في ١٠٠٠ موسوعة تضم الواحدة منها ١٠٠٠ صفحة (المليارات الثلاث لحروف المجين *génome* البشري)، وهذا يتم بلا فهرس وبلا صفحات مُرقّمة! "تقوم" المسابير بمفردها بتعيين الجين المنشود بفضل نوعيّة التفاعلات الجزيئية فيما بين الحموض النووية.

تُعتبر المسابير الجزيئية حالياً الحلفاء الضروريين في البحوث الأساسية في ميدان البيولوجيا. لكنها أيضاً تُستعمل مع المعدّات الجديدة لتشخيص الأمراض المعدية. فهي تسمح مثلاً بوسم جين العامل VIII (العامل الأساسي في تخثّر الدم والضروري في علاج الناعور *hémophilie*) لصنع البروتين بواسطة الهندسة الجينية، أو بتعيين العيوب الجينية التي من شأنها أن تؤدي إلى سرطان القولون على الصبغي البشري رقم ٥. وبفضل هذه المسابير، استطاع بعض الباحثين (أمثال اختصاصي المناعة س. تونيغاوا S. Tonegawa الحائز على جائزة نوبل في الطب لعام ١٩٨٧) أن يفهم بشكل أفضل كيف تتحد الجينات لتكوين التشكيلة الخارقة للأضداد وتغيير الاستجابة المناعيّة. سواء تركيز البحث على الأمراض الجينية أو الأمراض المعدية، الفيروسية أو البكتيرية أو الطفيلية، في البحوث حول السرطان والمناعة والشيخوخة، أو في ابتكار لقاحات جديدة: ما من ميدان واحد في البيولوجيا أو في التقانة الحيوية لا يحتاج إلى مسابير التهجين الجزيئية، كونها حلفاء الإنسان غير المرئيين في عملية "صيد الجينات".

مهندسو اللامتناهي في الصغر

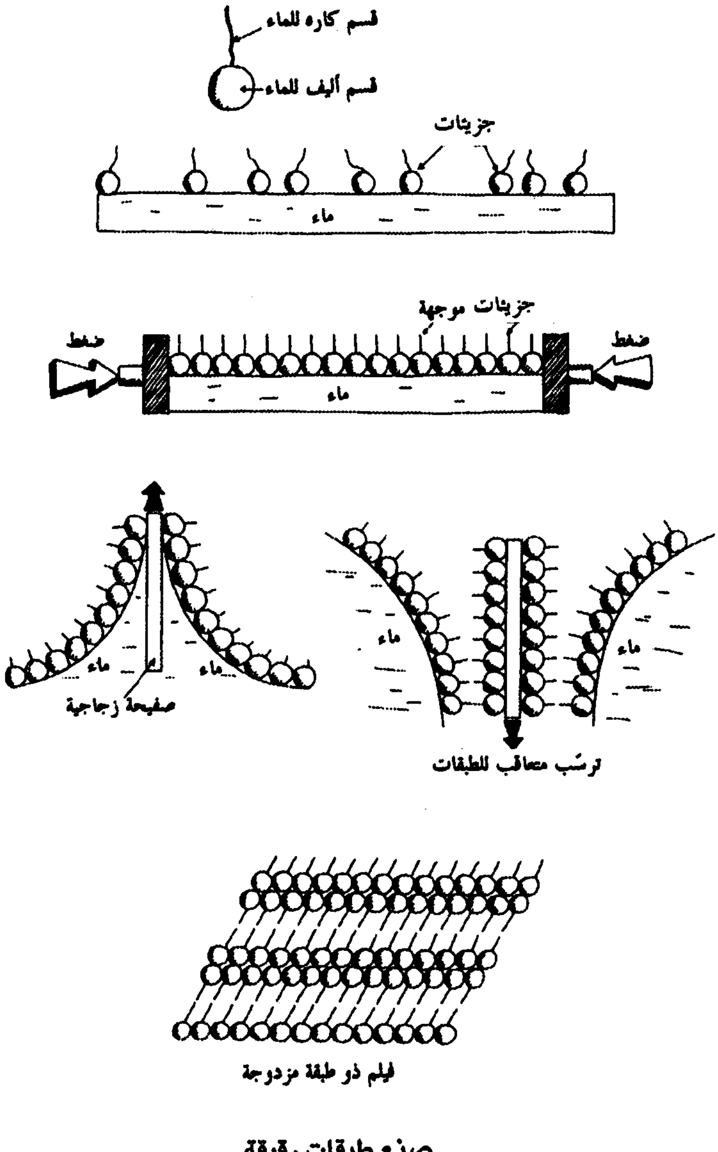
يُدخلنا التقدم الذي حققه الكيميائيون والبيولوجيين اليوم في

عصر جديد للهندسة: ألا وهو عصر الآلات الجزيئية التي يمكن للإنسان مراقبتها، وهي آلات لا تُرى بالعين المجردة، تقيس بضعة أجزاء من مئات الميكرونات ولكنها قادرة على تنفيذ مهام دقيقة.

صنع مهندسو الميكانيك في أول الأمر آلات كبيرة الحجم لتحويل المادة أو لتسهيل انتقالها: آلات العدد، وأدوات الثقب، وأدوات القص والمكابس، وآلات التطريق، والقاطرات والسيارات. وكانت المعلومات اللازمة لإنتاج هذه الآلات مدرجة في خرائط تنتقل إلى آلات أخرى أو إلى الروبوط (الإنسالي). هنا، تكون المعلومة خارج المعادن المحوّلَة، كأن توجد مثلاً في شكل مكبس التطريق. وبفضل تقدم البيولوجيا الجزيئية والكيمياء العضوية تمكن "مهندسو اللامتناهي في الصغر" من إعادة برمجة البكتيريا، مصانع البيولوجيا الصغرى، أو ضم أبنية فوق جزيئية بالاستعانة بصندوق من الأدوات المصنوعة من جزيئات تتجمع مثل قطع اللعبة المركبة Lego.

في بعض الحالات، يترك هؤلاء هذه الأبنية تتجمّع ذاتياً بفضل خصائص الذرات التي تمثّل موادها الأولية. وهذه المرة، تكون المعلومة في قلب المادة وليس خارجها على الإطلاق. وإذا قمنا بتفريق بعض الفيروسات إلى قطعها الرئيسية المُفكّكة (مثل العاثية T_2)، ستتجمّع هذه القطع بشكل تلقائي بحيث تتطابق كل قطعة مع القطع المتمِّمة.

مثال آخر عن التجمّع الذاتي: طبقات "ل ب" L B. منذ عشرين سنة تقريباً، اخترع عالم الكيمياء ـ الفيزيائية لانغمير Langmuir ومساعدته بلودجت Blodgett طريقة لصنع طبقات رقيقة تحمل اليوم اسميهما. وقد أظهرت طبقات لانغمير ـ بلودجت نفعاً كبيراً في العالم لصنع الدارات التي تقوم أساساً على قوانين الالكترونيات الجزيئية. تتكوّن هذه الطبقات من الجزيئات التي لها قسماً كارهاً للماء وآخر أليفاً له مثلما يبين الرسم التالي.



صنع طبقات رقيقة

هذه هي قوانين التجمع والتنظيم الذاتي التي فهمها تدريجياً البيولوجيون والكيميائيون. وهم يمارسون اليوم هندسة تنطلق مما هو مجهري نحو الكبير وليس أبداً مما هو كبير نحو المجهري فقط، وهي هندسة مهدت لها طرق النمنمة miniaturisarion المتزايدة الصغر. وتجدر الإشارة إلى أن الفرنسي جان ماري لين Jean - Marie Lehn والأميركيين دونالد كرام Donald Cram وشارلز بيدرسن Charles Pederson نالا جائزة نوبل سنة ١٩٨٧ مقابل جهودهم في وضع مبادئ لمثل هذه الهندسة الجزيئية. وقد نجح هؤلاء المهندسون المعماريّون الجدد في اللامتناهي في الصغر في صناعة جزيئات قادرة مثل الأنزيمات على تنفيذ مهام معينة: التعرف إلى جزيئات أخرى وحصرها وتصفيتها وفرزها ونقلها أو التحكم في المعلومة من بعد ("أسلاك جزيئية").

تملك الخلية الحية مثل هذا النوع من الآلات الجزيئية وبامكانها أن تحقّق أكثر الوظائف تنوعاً. فالمضخات ومحطات النقل ورؤوس القراءة واللوالب وآلات العدد والرافعات والمكّوكات والقنوات تعمل جميعها على المقياس الجزيئي بفاعلية كبيرة. واليوم يحاول علماء البيولوجيا والكيمياء نسخ هذه الآلات أو تحويلها. ويعتبرون أن أولى أهدافهم هي من غير ريب الأنزيمات، تلك الآلات الجزيئية المتطورة والقادرة على حفز عشرات الآلاف من التفاعلات التي تحدث بلا انقطاع في الخلية. كيف نجعل الأنزيمات أكثر فاعلية وأكثر صلابة وأكثر استدامة من أجل استخدامها مثلاً في العمليات الصناعية أو في الطرق العلاجية الجديدة أو في اختبارات التشخيص؟ يرتكز السبيل المبشّر بكثير من الخير ـ بانتظار التخليق التام لأنزيم على المقاس ـ على تغيير بعض الأقسام من المخطط الجيني لأنزيم أو لآخر (متواليات حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك التي "ترمز" إلى هذا البروتين). يتركّب البروتين (كما رأينا في ص ٧٠) من سلسلة من الحموض الأمينية الملتفّة حول نفسها. يكوّن هذا الالتفاف تجاويف

ونتوءات وثقوباً (هي بمثابة المواضع الحيويّة) تُجيز التعرف إلى بعض البنى الجزيئية (ركائز الأنزيم)، لكنها تجير أيضاً تغييرها سواء عن طريق قصها أو تجميعها (انظر الرسم ص ١٧٠).

عندما نتعرّف على متوالية الحموض الأمينية التي تؤلف الموضع الحيوي للأنزيم، يمكن أن نستنتج منها ماهيّة متوالية النُوكْلِيُوتيد التي هي عبارة عن ترجمتها الجينية المرموزة. بعد ذلك يمكننا تغيير هذه المتوالية لكي نضع في مكان معيّن من الموضع الحيوي حمضاً أمينياً آخر يملك تجمعات كيميائية قادرة على أن تتمسك بقوة شديدة بالركيزة. وسيكون لتأثير ذلك أن تزيد في قدرة الأنزيم التحفيزيّة. يطلق على هذه الطريقة الواعدة بمستقبل أفضل اسم **التَطْفيرٌ المُوَجّه** *mutagenèse dirigée*، واحدة من الأدوات القاعديّة لهندسة البروتينات. قبل مباشرة هذه الطريقة، كان من الواجب القيام بطفرات بلا تبصّر: إما بأشعّة X (التي تغيّر تنظيم المعلومة الجينية وتسبب أخطاء و"صدفات" في نصوص مخططات صنع البروتينات)؛ أو بمواد كيميائية لها تأثير مماثل. وتُعتبر الطفرات الطبيعية المصدر الرئيسيّ لتنوّع الأجناس الحية (بالتغييرات وإعادة التنظيم وإعادة التركيب الداخلي للإرث الجيني). هذه الطفرات هي أيضاً سبب للأمراض الجينية، مثل فقر الدم المنجلي الفظيع الذي يضرب الأفارقة الشبان. في هذه الحالة، تحمل الطفرة على واحد من الحموض الأمينية لبروتين الهيمُوغلُوبين، ويُستبدل حمض الغلوتاميك GLU بالفالين VAL؛ وهو ما يكفي لتغيير شكل الخلايا الحمراء (من قرص مسطّح إلى هلال مؤنّف) وجعلها تسدّ الأوعية الدموية الصغيرة.

تمر السبل المستقبلية لهندسة البروتينات بمرحلة التكهّن بالبنية الثلاثية الأبعاد للأنزيم انطلاقاً من متوالية الحموض الأمينية التابعة له (الترتيب الذي تتعاقب وفقاً له). ولكن ذلك يتطلب إجراء حسابات

شديدة التعقيد بواسطة الحاسوب. ومنذ حوالى عشرين سنة والعديد من المختبرات تسعى جاهدة لعلاج هذه المسألة. لكن ما من حلّ جذري مُنتظر في المستقبل القريب. وهناك سبيل آخر: هو محاكاةُ تفاعليّة الموضع الحيوي على الحاسوب بتغيير الحموض الأمينية التي تركّبه. في هذه الحالة، تكون البرامج معقّدة جداً ولا تمثّل في الوقت الراهن إلا مقاربة أولية.

تشكل كل من هندسة البروتينات وإنتاج الأنزيمات على المقاس ميداناً استراتيجياً للتقانات الحيوية. فكلاهما يُعتبر محوراً لمنافسة عالمية حية ويحتاج إلى معدات ثقيلة (آلات أوتوماتية وحواسيب، وطرفيّات بيانية لعرض البنى الثلاثية الأبعاد). لكن التمكن من هذه الأدوات يفتح المجال أمام مواد جزيئية جديدة (مساحات تحفيزيّة)، وأمام طبقات رقيقة لصنع لاقطات بيولوجيّة (تُستعمل في اختبارات التشخيص أواختبارات البدلات القابلة للغرس)، ولكن أيضا أمام دارات للحواسيب الجزيئية (الإلكترونيات الجزيئية) وأمام أدوية جديدة. أما عن الأداة التي جعلت مثل هذه الثورة ممكنة في البيولوجيا فهي الحاسوب بلا منازع..

الحاسوب والكائن الحي

يُعتبر اتحاد الحاسوب والبيولوجيا أمراً ناجحاً ومثمراً. إذ إنه من غير الممكن أن يكون للتطورات والأدوات الجديدة التي سبق ووصفناها في الصفحات السابقة نفس التأثير اليوم من غير المعلوماتيات. ويعدنا المستقبل بالمزيد.

تشجّع الطبيعة على مثل هذا الاتحاد. من ذلك أن جزيئات الحياة أي البروتينات والحموض النووية، تحمل معلوماتها المُدوّنة في شكل تسلسل خطي من الحموض الأمينية (بالنسبة للبروتينات) أو النوكليوتيدُ (بالنسبة للحموض النووية) (انظر ص ٧٠ وص ٧٥). هذا

التعاقب للعلامات المرموزة يماثل تعاقب الحروف في كلمة، أو تعاقب الكلمات في جملة، أو تعاقب الجمل في فقرة. فمن الطبيعي إذن أن تكون البرامج التي وضعها المعلوماتيون لمعالجة سلاسل الحروف ملائمة لمعالجة المعلومة البيولوجية. تسمح هذه البرامج بخزن المعلومة البيولوجية ومعالجتها واستعمالها.

لقد أصبح الحاسوب في غضون بضع سنوات المساعد الأساسي على التطور المُتفجّر للبيولوجيا. يتدخل الحاسوب في البنوك الكبرى لمعطيات الجينات والبروتينات، أو بشكل رقاقات مُدمجة في الأجهزة الأكثر تنوعاً. وما من مختبر لا يعتمد على الحاسوب في عمله. فهو يتولى القيام بجميع المهام: التخطيط للتجارب، وتحليل النتائج، وإدارة المعلومة المخبريّة، وتصميم الجزيئات الجديدة، وحيازة المعطيات، وتحرير التقارير والمقالات، وتنفيذ المخططات أو الرسوم البيانية.

لكن من بين الاستعمالات المذهلة للحاسوب في البيولوجيا، يقوم أحدها على مقارنة متواليات الجينات والبروتينات في "أطلس" مخزونة لهذا الغرض في ذاكرات الحواسيب الكبرى في جامعة ستانفورد، أو في جين بانك Gen Bank في لوس ألموس، أو في معهد پاستور، أو في المركز الأوروبي للبيولوجيا الجزيئية في هايدلبرغ . من جهة أخرى، تقوم شبكة المعلوماتيّات البُعدية، بيونت BIONET بالجمع، على الصعيد العالمي، بين البيولوجيين الذين يطمحون إلى تبادل المعطيات والنتائج في ما يتعلق بهذه الميادين. فباستعمال مثل هذه البرامج الحاسوبية، نجح الباحث الأمريكي راسل ف. دوليتل R. F. Doolittle سنة ١٩٨٣ مع زميله البريطانيّ مايكل د. واترفيلد M. D. Waterfield في اكتشاف علاقة غير منتظرة على الإطلاق بين جين ورمي فيروسي ومتوالية حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك التابعة لعامل طبيعي، PDGF، كونها عامل النمو المشتق من الصفاحات الذي يلعب دوراً في لأم الجروح (انظر

ص ٢٠٩). ومنذ ذلك الحين والحاسوب يسمح بربط جينات ورميّة أخرى بمنتجات طبيعية للخلايا التي تلعب بالخصوص دوراً في النمو أو الانقسام الخلوي.

وهنالك تطبيق مذهل آخر للحاسوب في البيولوجيا يتمثل في تمثيل جزيئات الحياة على الشاشة. يسمح هذا التمثيل الملوّن الثلاثي الأبعاد بصنع نماذج تيسّر فهم آليات حركة هذه الجزيئات، وبالتالي تصميم جزيئات جديدة. وهذا ما نسميه تصميم الجزيئات بمُساعدَة الحاسوب CMAD، ونقل طرقِ التصميم بمساعدة الحاسوب CAO، التي يستعملها مهندسو صناعة السيارات أو مهندسو الفضاء لكي تطبق على اللامتناهي في الصغر.

إن الثورة المفهوميّة والتكنولوجيّة لاتحاد الحاسوب مع البيولوجيا تجعل ممكناً من الآن فصاعداً استعمال المعلومة البيولوجية (والجزيئات التي تحملها) تارة الكترونياً (على الحواسيب) كما سنراه لاحقاً وطوراً مادّياً (في المختبر). يتم ذلك بفضل أدوات جزيئية قادرة على فرز واختيار وقصّ وإعادة إلصاق قِطع جزيئات حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك أو قِطع البروتينات. هذه الأدوات هي الأنزيمات والأضداد أحادية النسيلة ومسابير التهجين التي بحثناها آنفاً. ويسمح تآزر هذه الأدوات بابتكار طرق جديدة للبحث والتطوير الصناعيين، ممّا يساهم بدوره في ازدهار الصناعة البيولوجية (انظر لاحقاً ص ص ٢٤٤ ـ ٢٥٠).

لكن الحاسوب يسمح بالتقدّم خطوة أخرى إلى الأمام: ويتمثّل ذلك بالربط بين العقول والشبكات. توحي الشبكة العصبونيّة بتصميم للدارات الإلكترونية. بالمقابل تفتح النمنمة المُفرطة للدارات مجالات جديدة أمام البيولوجيين. إنّ العلوم المعرفيّة والذكاء الاصطناعي، البيولوجيا العصبيّة والإلكترونيات الجزيئية، الشبكات العصبونيّة والهندسة المتوازية لحواسيب الغد، هي ميادين واعدة لا تحصى

للمستقبل. إنها الفتوحات التكنولوجية والتطورات التي تقود إلى واجهات بينية جديدة بين الدماغ البشري والآلات. إنها أيضاً الصلات الإلكترونية البيولوجية التي تقلب الحدود بين الكائنات البيولوجية والحواسب "الجزيئيّة". إنه ميدان البيولوجيا المعلوماتية الذي يشكل ذروة الصلة بين البيولوجيا والمعلوماتيات.

- ٣ -

صناعة الكائن الحي

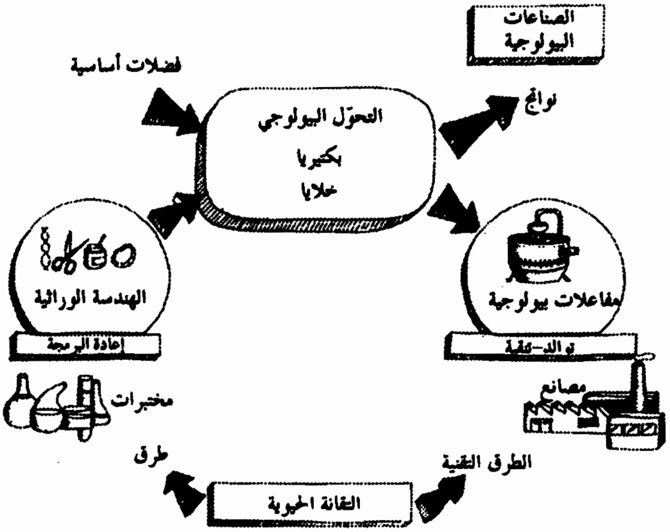
ولادة الصناعة البيولوجية

أدت الأدوات و"الآلات" التي أتينا على وصفها إلى ولادة الصناعة البيولوجية، أي صناعة الكائن الحي. وعلى الرغم من أن هذه الصناعة لم تكن موجودة عملياً في سنة ١٩٨٠، فإنها اليوم تشكل أكثر من ٦٠٠ مؤسسة في العالم، قسم كبير منها موجود في الولايات المتحدة. بعضها يصل عمره إلى خمس سنوات. وقد قامت شركات تمويل الاكتشافات باستثمار ١٠٠ مليون دولار في التقانة الحيوية خلال السبعينات، وارتفع حتى بلغ ٣ مليارات دولار سنة ١٩٨٦.

لقد أدّى تقدم التقانة الحيوية إلى تطور الأدوات الجزيئية والإلكترونية الأفضل أداءً مما فتح آفاقا جديدة أمام البحث الأساسي والبحوث التطبيقية والتطور الصناعي. ومع ذلك فهذه التقنيات التي تشهد اليوم ازدهاراً مذهلاً تبقى تقنيات محدودة. لقد تعلّم الإنسان عفوياً كيف يستخدم الجراثيم النافعة (تحديداً الخمائر) لصنع الكحول والخبز والجبن. وفيما بعد، اكتشف وسائل حفظ المواد القابلة للتعفن، وذلك بفضل التخمير اللبني (تخزين الغلال والشكروت والتوابل والتمليح) الذي أحدث وسطاً حمضياً يمكنه إبعاد الجراثيم الضارة.

ترتكز ثورة التقانة الحيوية على معرفة جيدة بمختلف أصناف

الكائنات المجهرية النافعة وطرق برمجتها بواسطة الهندسة الوراثية. ويعود الفضل إلى لويس باستور في تعريف القواعد الأساسية للبيولوجيا المجهريّة الصناعية: كيف نتفادى العدوى ونضمن خاصية التخمير ونتعرف إلى "الجراثيم" الضارة ونميّزها عن الجراثيم النافعة. وفيما بعد، وبفضل البيولوجيا الجزيئية وأعمال جاك مونو وفرنسوا جاكوب، وضعت قوانين "تدْجين" الجراثيم بوضوح ولأول مرة على يد الإنسان. فعوضاً عن استخدام ذُرّيات بكتيرية أو خمائر منتقاة من الطبيعة، أصبح بالإمكان "صنع" ذُرّيات جديدة قادرة على إنجاز مهام محدّدة.



يمكننا تعريف التقانة الحيوية على النحو التالي: إنها، بفضل التطبيق المتكامل لمعارف وتقنيات الكيمياء البيولوجية والبيولوجيا الدقيقة وعلم الوراثة والهندسة الكيميائية، تمكّنت على المستوى التكنولوجي من الانتفاع بخصائص وقدرات الكائنات المجهرية والمستزرعات الخلويّة. وهذا ما سمح بابتكار أدوات نافعة للمجتمع.

وعلى الرغم من ذلك، فنحن لا نستطيع فهم تطور التقانة الحيوية والانتقال من قارورة المختبر إلى المخمّرات العملاقة في المصانع إلا بالجمع بين خاصيتين من خصائص الكائنات المجهرية: إعادة برمجة حمض الديوكسي ريبونوكلييك الخاص بها بواسطة الهندسة الوراثية وقدرتها الخارقة على التوالد.

وعلى عكس الفكرة السائدة، لا يبحث البيولوجيون في بكتيريا واحدة أو في سلسلة واحدة من حمض الديوكسي ريبونوكليك، ولكن بحثهم يستهدف الملايين من الخلايا أو الجزيئات. إذن لا يتعلق الأمر بنوع من "الجراحة المجهرية"، ولكن بابتكار مجموعة من السيرورات الكيميائية ـ البيولوجية على جمهرة من الجزيئات والخلايا، وذلك بتوظيف أنزيمات خاصة قادرة على أن تتعرف من بين الجزيئات الموجودة إلى تلك التي تتفاعل معها.

لقد ساهم بعض الرواد في تأسيس الصناعة البيولوجية. كما أن التجارب الأولى للهندسة الوراثية بدأت في المختبرات الجامعية، وذلك بفضل تلاقي العديد من ميادين البحث. لكن التاريخ احتفظ بأسماء بعض العلماء والمدراء الذين نجحوا في تحويل المعرفة الجامعية نحو الصناعة بإنشاء المؤسسات الأولى للهندسة الوراثية وتقديم براءات الاختراع الأولى في هذا المجال. من بين هؤلاء، د. غلاسر D. Glaser ورونالد كايب Ronald Cape الحائزان على جائزة نوبل واللذان أنشآ المؤسسة الأولى للهندسة الوراثية، سيتوس Cetus سنة ١٩٧١ في بيركلي بكاليفورنيا. بعد ذلك جاء دور شركة جيننتك Genentech التي تأسست سنة ١٩٧٦ على يد رجل العلم هربرت بواييه Herbert Boyer ومدير الأعمال روبرت سوانسن Robert Swanson. فقد كان هذان الشريكان رائدين للصناعة البيولوجية العالمية الحديثة من خلال عدد كبير من المشاريع والمواد الجديدة. وفي سنة ١٩٧٨ لم يكن يوجد سوى أربع مؤسسات للتقانة الحيوية في العالم: سيتوس،

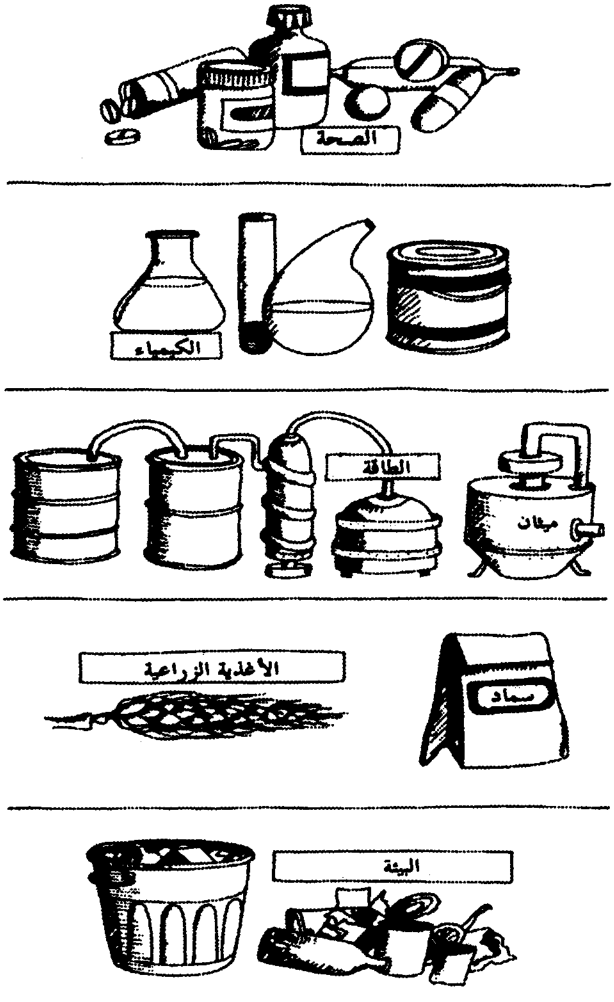
وجينتك، وجينكس Genex وبيوجن Biogenثم بلغ هذا الرقم ثلاثين مؤسسة سنة ١٩٨٠ وخمسمائة مؤسسة سنة ١٩٨٧.

شرعت هذه المؤسسات قبل كل شيء في تطبيق تقنيات الهندسة الوراثية لإنتاج المواد الأربع المطلوبة أكثر من غيرها في الأسواق مع بداية الثمانينات: الأنترفيرون، وهرمون نموّ الإنسان، والأنسولين، ولقاح التهاب الكبد البائي. ويتمّ الحصول على كل هذه المواد حالياً بهذه الطرق ثم تسوق تجارياً. ثم تبعتها العديد من المواد الأخرى، خاصة في مجال الصيدلة والأغذية الزراعية والطب البيطري. ومن بينها: مبيدات الحشرات، واللقاح ضد الحمى القلاعية، واليُوروكِينَاز لعلاج الأمراض الكَلوية، ومنشط مولّد بلازمين الخلايا TPA (مادّة تمنع تجلّط الدم)، وعامل نخر الأورام TNF، والأنترلوكين (بروتين يستعمل في علاج السرطان)، والهيرودين، والبروتين المضادّ للتخثر الذي "استعير" جينه من العلق. هذه المادة الأخيرة اكتشفتها، سنة ١٩٨٧، مؤسسة ترانسجين Transgène، المؤسسة الفرنسية الأولى للتقانة الحيوية التي أنشئت سنة ١٩٨٠ على أيدي پيار شامبون Pierre Chambon وفيليب كوريلسكي Phillipe Korilsky بتمويل من مؤسسة باريبا Paribas للتكنولوجيا.

لا بطالة للميكروبات

واليوم، تخصّ الصناعات البيولوجية بالأساس الصناعة الصيدلية والأغذية الزراعية والبيئة والكيمياء والطاقة.

- **الصناعة الصيدلية**: في ميدان الصيدلة، تشهد المؤسسات الكبرى منافسة حادة. وقد سبق أن ذكرنا المواد الأساسية، وعلى وجه الخصوص منشّط مولّد بلازمين الخلايا TPA، والأنترلوكين، والأنترفيرون، واللقاحات الكبرى ضد الطفيليات والفيروسات (الملاريا، الالتهاب الكبدي، الحَلأ، فقدان المناعة).



التقانة الحيوية

ـ **الأغذية الزراعية**: نحن نعلم أن الجراثيم يمكنها أن تنتج بروتينات من نفس نوعية البروتينات الحيوانية أو البروتينات النباتية. تتميز الكائنات المجهرية بتكاثرها السريع، المستقل عن الظروف المناخية، ما يؤدي في بضعة أيام إلى أطنان من البروتينات انطلاقاً من عدة ركائز. والأرقام هنا معبِّرة: عِجل يزن ٥٠٠ كغ لا ينتج سوى ٥٠٠ غرام من البروتينات خلال ٢٤ ساعة، في حين أن ٥٠٠ كغ من الجراثيم تنتج من ٥ إلى ٥٠ طناً في القدر ذاته من الوقت! كما أن جراثيم تتّحد من جديد، تفرط في إنتاج البروتينات، ما يجعلها تُستعمل من طرف العديد من المؤسسات الكبرى.

من الممكن أيضاً تنمية المخزون الغذائي الموجود مع تجنب كل الكائنات التي تسعى إلى تدميره. بذلك يصبح "الكفاح البيولوجي" ضد الحشرات قادراً على الحفاظ على المحاصيل. ونحن نعلم أن جراثيم نافعة (**العصويّة الثورنجيّة** *Bacillus thuringiensis*) تنتج ذَيفاناً قادراً على إبادة بويضات الحشرات. ويتم حالياً اللجوء إلى الهندسة الوراثية لصُنع البكتيريا المنتجة لهذا الذيفان وحتى جعلها تفرزه مباشرة بواسطة أوراق الأشجار المعالجة.

أخيراً، إن أحد الآمال الكبرى للبيولوجيين يتمثل بالترويض أو التحكم في التثبيت المباشر للنتروجين الجوي لصُنع الأسمدة البيولوجية عوضاً عن السماد الآزوتي المكلف في مجال الطاقة. ونحن نعلم بالفعل أن النباتات البَقليّة قادرة على حبس نتروجين الهواء بفضل الجراثيم التي تتعايش في عقيداتِ جذورها، كما أنها قادرة على صُنع الأمونياك واستعماله في تخليق بروتيناتها. إنّه شأن فول الصُويا أو العَدس أو الحمص أو البرسيم. ويعمل الباحثون من أجل إدخال جينات تمكّن من صُنع الأنزيمات المسؤولة عن تثبيت النتروجين في النجيليّات كالذرة الصفراء أو القمح.

ـ **البيئة**: يكدّ البيولوجيون في هذا الميدان لصنع الجراثيم القادرة

على إتلاف الفضلات الخطرة. إن بعض البكتيريا من نوع **الزائِفَة** *Pseudonomas* مثلاً، أو الفطريات المجهرية، تتلف الهيدرُوكَربونات المُكلورة وتحوّلها إلى مواد غير ضارة بالبيئة. فاليابانيون يستعملون مفاعلات بيولوجية تمر فيها الفضلات الصناعية الملوثة. وفي نهاية هذه المفاعلات البيولوجية تُفصل المواد البسيطة (ماء أو ثاني أكسيد الكربون أو ميثان) بدون خطورة.

ـ **الطاقة**: نحن نعلم أن الجراثيم هي أساس للعديد من السيرورات المنتجة للطاقة. وهناك جراثيم تتلف السليلوز وتنتج كحولاً قابلاً للاستعمال كوقود. وهناك جراثيم أخرى تصنع الميثان من خلال الفضلات العضوية. تطلق الطحالب أو الجراثيم الهيدروجين تحت تأثير الأشعة الضوئية. لكننا ننتظر الكثير من تقنيات الاتحاد الجيني لتحسين مردود هذه البكتيريا والخمائر والطحالب والفطريّات.

وعلى سبيل المثال، من بين الطرق الأكثر استغلالاً حالياً انحلال السليلوز لإنتاج الكحول كوقود. ونحن نعلم أنّ الخمائر لها قدرة فائقة على إنتاج الكحول انطلاقاً من السكّر. فمنذ قرون، كنا نصنع الكحول من خلال **الفُطريّة السُكّريّة الجِعَويّة** *Saccharomyces cerevisae*. وتكمن العقَبة الكبرى في أن الخمائر لا يمكنها تحويل السليلوز إلى الغلوكوز الذي تبدأ من خلاله عملية التخمير. في المقابل، هناك بكتيريا مثل **المِطثّية ترموسلّوم** *Clostridium thermocellum* قادرة على معالجة فضلات السليلوز وتحويلها مباشرة إلى كحول. لكن هذه الجراثيم، للأسف، مثبّطة في إنتاجها الذاتي للكحول. وهدف الباحثين هو إدخال الجينات المسؤولة عن انحلال السليلوز (الرامز لأنزيمات السيلولاز) في الخمائر، ما يسمح لها بمعالجة مباشرة لسليلوز ثُفْل قَصب السُكر أو لسليلوز القّش أو حتى الورق لتحويله إلى كحول. تُجرى العملية اليوم وفقاً للعديد من

المراحل بواسطة الفطريات من نوع **الشُعريات الأدمة** *Trichoderma*، القادرة على تحويل السليلوز إلى سكر. بعد ذلك، يُخمّر عصير السكّر الناتج بطرق تقليدية. ولو كان بالإمكان تحقيق انحلال السليلوز في مرحلة واحدة، لكان من السهل القيام بالعديد من التطبيقات الهامة الكبرى.

ـ **الكيمياء**: يمكن للجراثيم أن تنتج مواد أوليّة للكيمياء. فخلال الحرب العالمية الأولى، استعملت السيرورات البيولوجية لإنتاج الأسيتُون أو البوتانول. فإذا وجهنا بشكل اختياري ـ بفضل الهندسة الجينيّة ـ طرق التخليق البيولوجي الطبيعي للكائنات المجهرية، صار بإمكاننا أن نجعلها تنتج كميات كبيرة من مادة معيّنة. وهكذا تتطور، بجانب الكيمياء النفطية الكلاسيكية، "الكيمياء الخلوية" أو "الكيمياء العضويّة" التي تَستعمل الجراثيم لصناعة المواد الأساسية الصالحة بعد ذلك لصُنع المُذيبات أو المستحلبات أو المواد الملاطة أو المواد البلاستيكية، وجميعها مستلزمات أساسية لصناعة الغد.

لقد تم اليوم التحكّم في التقنيات الأساسية للصناعة البيولوجية. فتخليق الجينات يتم بواسطة الآلات الأوتوماتية، و استنساخ الجين ينجز في أقل من أسبوع. كما أن صناعة حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك المتمّم انطلاقاً من الرنا المرسال تحدث اليوم بصفة روتينية في المختبرات المختصة. وقد سبق أن دُرّست هذه التقنيات في أعمال تطبيقية للبيولوجيا الجزيئية في الجامعات الأكثر تقدّماً.

مستقبل الصناعة البيولوجية

اعتمدت المرحلة الأولى في تطبيقات الهندسة الوراثية بشكل خاص على صناعة المواد الطبيعية التي لم يمكن الحصول عليها سوى بكميات صغيرة بواسطة التقنيات الكلاسيكية للاستخراج والتنقية. ولم يكن من الممكن التخلّي عن هذه الطريقة الأولى، لكن

استكمالها جرى باستعمال تقنيات الهندسة الوراثية لتغيير آليات إنتاج الخلايا الحية. والواقع أن البكتيريا التي أعيدت برمجتها تكون هشّة فتفقد أحياناً جيناتها الثمينة. في المقابل تكون الجراثيم المعزولة في الطبيعة، والتي تُكوّن مثلاً أساس الصناعة البيولوجية اليابانية (المواد الغذائية، المضادات الحيوية، المستقلبات، الأنزيمات)، أكثر مقاومة من غيرها. والحال أنّه يصبح من السهل اليوم تغيير سبل التخليق البيولوجي الداخلي لكائن مجهري صناعي وجعله بذلك أكثر فاعلية في توازنه الطاقي أو في استعماله الأمثل للكربون كمصدر أساسي للتخليق.

مثل هذه الجراثيم لا توجد في الطبيعة لكنها تُظهر خصائص "مفصّلة" حسب الطلب تهم الصناعات الكيميائية أو المواد الغذائية الزراعية. فعلي سبيل المثال يسمح التغيير الجيني لسلالة بكتيريّة تنتج بروتيناً يتدخّل في تكوين بلورات من الثلج بتجنب الأضرار التي تهدد النباتات بواسطة التجميد. كانت التجارب الميدانية جاهزة للعمل، لكن الخلافات كانت أكثر حدّة في الولايات المتحدة بين الصناعيين وعلماء البيئة منها في أوروبا. هل يمكن للجراثيم المطلقة في البيئة أن تنقل الأمراض، إن لم نقل إنها تقلب الدورات البيئية؟

توجد طريقة واحدة لتسكين رَوْع المدافعين عن البيئة: القدرة على اقتفاء آثار هذه الجراثيم في التربة. لذلك قام الباحثون بالتنافس على البراعة والحذق باللجوء إلى التقانات البيولوجية الأكثر تطوراً. وهنالك مؤسسات عمدت إلى تطوير بكتيريا منتجة لذيفان يؤثر في الحشرات. ولكي يتم تفادي "هروبها"، فقد جعلوها "فلورية"، تبعث ضوءاً أزرق عند تعرّضها للأشعة فوق البنفسجية. وهكذا يمكن كشف وجودها في العيّنات التي تؤخذ من التربة. وقد صنع باحثون آخرون فيروساً يهاجم اليساريع لكنه يحتوي على جين يتأثر بالأشعة الشمسية. هذا الفيروس لا يمكنه أن يعيش خارج الكائن الذي ألحق به العدوى.

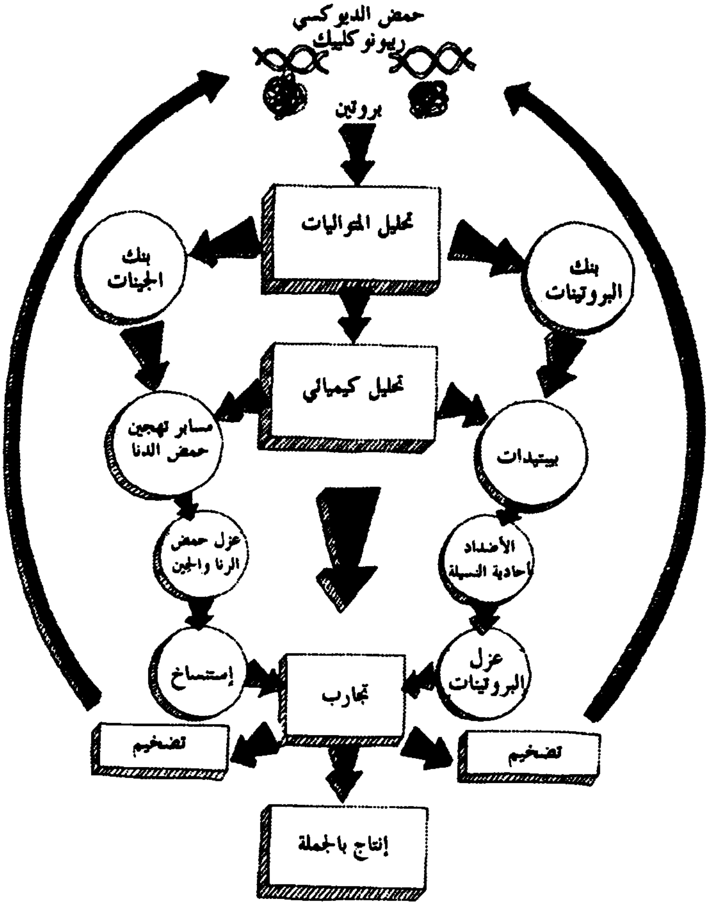
إن قائمة الذُريات المسجّلة على يد الصناعيين والتي تترقّب إذناً بتجربتها ميدانياً (الجراثيم المثبتة للنيتروجين أو المتلفة للمواد السامة، الفطريات المجهرية المقاومة لمبيدات الفُطر) هي أصلاً قائمة طويلة. وتعتبر الرهانات الاقتصادية مهمّة. ورغم ذلك فإن هذه الجراثيم "المشغولة" لا تُطَمئِن بعض الخبراء الذين يخشون تغييراً في الدورات البيئية. فمشكلة براءات الاختراع في البيولوجيا تجعل المنافسة العالمية في الصناعات البيولوجية أكثر حدة. في ١٦ حزيران / يونيو ١٩٨٠، قبلت المحكمة العليا في الولايات المتحدة براءة اختراع كائنين مجهريين مصنوعين، الأول في شركة جنرال ألكتريك لتخفيف بقع البترول تدريجياً على سطح البحر والثاني في شركة أبجون (Upjohn) لإنتاج مضاد حيوي يُعرف باللِنْكُوميسين. ومنذ ذلك التاريخ، مُنح العديد من البراءات المهمّة الأساسية في الهندسة الوراثية لجامعة ستانفورد (براءة كوهين ـ بوايه) ولشركة جيننتك. وقد أرغم ذلك المئات من المؤسسات على دفع حقوق لهاتين الشركتين. لكن التاريخ الحاسم بخصوص براءات الاختراع البيولوجية يبقى بدون شك ٣ نيسان / أبريل ١٩٨٧، وهو اليوم الذي سمح فيه مكتب تسجيل البراءات الأميركي بتسجيل البراءة التي تخص الكائنات الحية العليا، باستثناء الإنسان (لأن التشريع في الولايات المتحدة "يمنع حقوق الملكية الحصرية على الكائنات البشرية"). وهكذا كان بإمكان مربّي الحيوانات أن يسجلوا نوعية جديدة من حيوانات تم الحصول عليها بواسطة الهندسة الوراثية. لكن كان لهذا القرار تداعيات معنوية وأخلاقية وأيضاً اقتصادية. وهذا ما أثار خلافاً عالمياً، ليس قابلاً لأن يهدأ.

مع بداية الثمانينات، ارتكزت نهضة التقانة الحيوية أساساً على الهندسة الوراثيّة أو الأورام الهجينة. أما اليوم، فإن الانتصارات في المختبرات الجامعيّة والصناعية تنتج من **اتحاد العديد من أدوات التقانة البيولوجية**. كما أن النجاحات تعود أيضاً للأجهزة الجديدة المستعملة

في المختبرات والتي تنتُج من التقدم الحاصل في الفيزياء والكيمياء والالكترونيات والمعلوماتيات وعلم المناعة والبيوكيمياء.

لقد تطورت الصناعة البيولوجية وفقاً لثلاث مراحل أساسية. خلال المرحلة الأولى، كان علم الوراثة والبيولوجيا الجزيئية وعلم المناعة هي المسيطرة. فهي تؤدّي إلى تطور أنزيمات الحصر ونواقل الاستنساخ والأضداد أحادية النسيلة. أما في المرحلة الثانية، فقد اكتشف الصناعيون تدريجياً أهمية التفاعل ما بين مختلف هذه الأدوات الجزيئية. كما استخدموا طرقاً جديدة للبحث تسمح بتدخّل مسابير التهجين والتطفير الموجّه والمعلوماتية. وهناك مرحلة ثالثة هي في طور الإنجاز: فلقد أصبحت التقانة الحيوية "شفافة" لأنها تُستعمل في العديد من البحوث والإنجازات الصناعية. والترابط بين أدوات التقانة الحيوية والمعلوماتيات والذي يكوّن مجموعة أساسية من هذه الطرق الجديدة، يمكن توضيحه من خلال الرسم التالي.

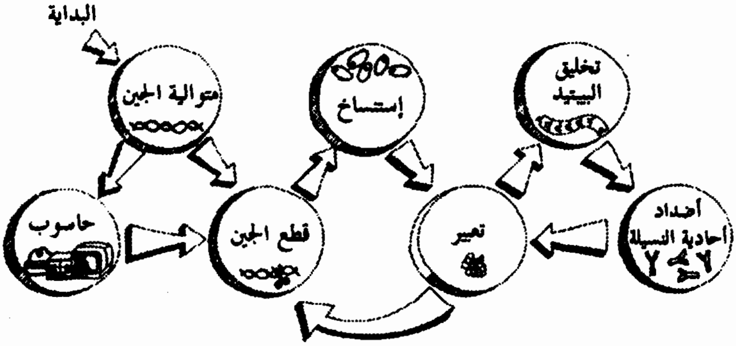
تتحد هذه الأدوات المختلفة ضمن استراتيجية شاملة. كما تظهر التفاعلات في عدة مستويات. يظهر في وسط المخطط المسلك "الكلاسيكي": نفصل في المختبر المواد غير المعروفة والتي تظهر في شكل بروتينات أو حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك. يؤدي تحليل متواليات الجزيئات إلى التخليق الكيميائي لبعض الجزيئات المشابهة لها التي تختبر بعد ذلك لمعرفة تأثيرها البيولوجي المحتمل. أما اليوم، فإن هذه المتواليات تقارن في بنوك المعلومات التي تحتوي على آلاف المتواليات الأخرى من حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك أو البروتينات (انظر ص ٢٣٥). يصبح ممكناً إذن استنتاج المعلومات الثمينة من هذه التحاليل والمقارنات لتخليق سلاسل قصيرة من الحموض النووية أو الببتيدات. فكلاهما يصلح إمّا لمسابير التهجين الجزيئي لفصل كميات أكثر أهمية من حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك أو لصناعة الأضداد أحاديّة النسيلة التي تسمح بفصل كميات أكثر أهمية من البروتينات.



يبرز الرسم أنه لا وجود اليوم لتقانة حيوية محددة، وإنما هناك ترابط بين أدوات التقانة الحيوية التي تنتمي إلى ميادين مختلفة ولكن متكاملة وهي: الكيمياء العضوية، البيوكيمياء وعلم المناعة وعلم الوراثة والبيولوجيا الجزيئية والمعلوماتيات. وهناك مثالان يبينان ائتلاف التقنيات: صناعة لقاحات الغد وفهم عمل جزيء الكابحة.

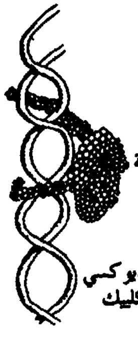
ولكي يتعرف الباحثون إلى بروتين مُستضديّ يصلح كأساس

للّقاح، فقد عمدوا في البداية مستعينين بحاسوب إلى تحليل المجموعات المختلفة لهذا البروتين. وتمكنوا بذلك من التعرف إلى المجموعات التي لديها أكثر حظوظاً للوجود خارج هذا البروتين أو داخله. وقد سمحت لهم هذه المعلومة بعد ذلك بإحداث شقوق في أماكن مختلفة من الجين، واستنساخ أجزاء مقتطعة في البكتيريا، وتحليل البروتينات المتولدة. وبفضل هذا "التشريح الجزيئي" المكرر لعدة مرات، نستعرض مدى تأثير تغيّرات مثل هذا التجمّع على الخصائص المستضدية للبروتينات. بعد ذلك، سوف نقارن البروتينات المتحصل عليها بمساعدة الأضداد أحاديّة النسيلة، بالمستضدّ الطبيعي. يمكننا أيضاً صناعة الببتيدات التخليقية ونسخ بعض "النماذج" المميّزة للبروتين. وستتعرض هذه الأخيرة بدورها إلى مواجهة الأضداد أحاديّة النسيلة لها، تلك الأضداد الموجهة ضد البروتين الطبيعي. وقد تمكن الباحثون تدريجياً من فصل المُسْتَضِد الذي سوف يُصنع من خلاله اللقاح.



يمكن ائتلاف التقنيات كذلك من فهم عمل البروتين الذي يرتبط بحَمْض الديوكسي ريبونوكلييك بصورة أفضل. تمرّر البروتينات المبلورة "تحت الأشعة X". ويمكّن ذلك من تحديد دقيق لوضعية المجموعات التي تكوّن بِناها ثلاثيّةِ الأبعاد. تمكّن هذه المعلومة من

صنع نماذج من البروتينات بواسطة الحاسوب. وبهذه التقنية يمكننا إذن أن ندرس جزيء الكابحة المشهور الذي مكّن اكتشافه من منح جائزة نوبل للأساتذة جاكوب ومونو ولوف سنة ١٩٦٥ (انظر ص ٩٧). يتفاعل جزيء الكابحة على حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك بتعلقه باللولب المزدوج. تُظهر النماذج التي يقدمها الحاسوب أن الكابحة "تتلولب" على حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك، كما يتلولب برغي كبير في لولب البرغي. يملك بروتين الكابحة، في الواقع، متوالية في شكل لولب "يقيم" في الفجوة الكبيرة لحَمْض الديوكسي ريبونوكلييك، بالإضافة إلى "ذراعين" يحيطان بها. ندرك إذن كيف أن الكابحة تحجز سيل المعلومات بدءا من حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك إلى الرنا المرسال ، ثم إلى البروتينات.



إنّ التحدّي العلمي والتكنولوجي لمستقبل الصناعات البيولوجية يمر بقدرتنا على توحيد مسالك البحث والتطوير، وكذلك على دمج الشبكات العديدة التي تعبرها الاكتشافات والابتكارات. لكن حواجز جديدة قد تظهر. وهي حواجز من نوع آخر. وهي ليست حواجز تقنية وإنما أخلاقية: فهل سيعيد الإنسان برمجة الإنسان؟

- ٤ -

الإنسان يهندس الإنسان

بعد أن استطعنا فهم مراحل الحياة بشكل أفضل، وبعد أن طورنا الأدوات الحديثة لتحويل الكائن الحي، ها هو الإنسان يحيا فجر ثورة أكثر أهمّية: ألا وهي تغيير الإنسان بواسطة الإنسان. لقد تم تطبيق أولى تجارب الهندسة الوراثية على البكتيريا. ثم تواصلت هذه التجارب على الخلايا العليا، الحيوانية أو النباتية. ونحن نملك الآن بأيدينا كل ما يمكننا من التدخل في جنسنا البشري: أولاً بقدرتنا على معالجة العيوب الوراثية وتقنيات الإنجاب المراقَب (الاخصاب بالأنبوب ونقل الأجنة)، وربما، في يوم قريب، بتغيير الإرث الجيني للفرد وذُريته.

ولكي نوفر فهماً أعمق لما تضعه الأساليب الجديدة تحت تصرّف البيولوجيين، يجدر بنا استعراض بعض التقنيات الأكثر تحديداً لمستقبل الحياة: معالجة الأمراض الجينية والإنجاب في الأنبوب والتجارب الجينية وورسم خريطة المجين البشري *génome*.

الجراحة الجديدة للجينات

لأول مرة في تاريخ الطب، حاول الإنسان معالجة الأمراض الجينيّة بالتصدي مباشرة إلى الجينات المعتلّة. ومن بين أهم الأمراض الجينية المسجلة في فرنسا والبالغ عددها ٢٠٠٠ هناك التثلّث الصبغي ٢١ (المغولية) الذي يصيب طفلاً واحداً على ٦٠٠ ولادة عادية، واللزاج المخاطي (١ على ١٥٠٠) والإعتلال العضلي *myopathie*

(مرض عضلي، ولادة واحدة على ٦٠٠٠). وبحسب منظمة الصحة العالمية، يعاني أكثر من ١٠٠ مليون شخص في العالم من أمراض دمويّة وراثية يمكن أن تكون مميتة، ويموت بسببها قرابة ٢٠٠٠٠٠ طفل سنوياً. وأحد الأساليب الوحيدة التي تسمح حالياً باكتشاف مثل هذه الأمراض هو الفحص المبكّر قبل الولادة. فإذا كان هذا الفحص إيجابياً، يستطيع الأهل أن يقرروا وضع حدّ لحمل خطر جداً لا يمكنه أن ينتهي بالطريقة الطبيعية. ونحن نعلم أيضاً ومنذ زمن قصير أن عدداً من الأمراض العصبية وبعض أنواع السرطان لها علاقة وثيقة بتشوّه أو تغيرات في الجينات.

لقد قلب تقدم الهندسة الجينية الأساليب التي يمتلكها الطب لمباشرة الفحص وعلاج الأمراض الوراثية. وقد رأينا كيف أن بمقدورنا اليوم أن نفصل الجين البشري وننقيه بكمية كافية لتحليله بدقة. أو كيف يمكن أن نستدلّ، بفضل مسابير التهجين الجزيئي - من بين المليارات من "حروف" الرمز الجيني - على "الجملة" التي تجمع بين الكلمات التي بها "أخطاء في الكتابة" الجينية، والمتسبّبة في الأمراض الوراثية. وهناك طريقتان بتصرف الباحثين لمعالجة هذه الأمراض: التأثير على جينات الفرد لمحاولة شفائه أو تغيير جينات خلاياه الجنسية بما يمكن أن يؤثر في سلالته.

لقد تحققت أول تجربة تسعى لمعالجة أحد الأمراض الجينية البشرية على يد البروفسور مارتين كلاين Martin Cline، من جامعة كاليفورنيا سنة ١٩٨٠، على مرضى متطوعين ولكن في ظروف يعتبرها المجتمع العلمي غير مقبولة، لأنها تحققت قبل الأوان وبدون إذن مسبق من السلطات الرسمية. منذ ذلك الحين والتجارب المطورة التي أجريت على الحيوانات تجعلنا نفكر بأن بعض حالات العلاج الجيني تتحقّق بحظوظ نجاح كبيرة. يمكن أن يكون النمط الجراحي في خطوطه العريضة كالآتي: يأخذ الباحثون أولاً من عظم ورك

الشخص المصاب بالمرض الوراثي خلايا النِقْي (إنها تسمح للكائن بصناعة خلايا أخرى ضرورية لعمله بصفة مستمرة). تُعالَج هذه الخلايا بعد ذلك في المختبر للحصول على جين "مصحَّح" بطرق الهندسة الجينية. ثم يُعاد زرعها في العظم حيث تنتج خلايا طبيعية. مثل هذا العلاج الجيني يقتصر على الفرد ولكن من الممكن معالجة الخلايا الإنتاشيّة بحيث يمكن نقل "التصحيح" الجيني إلى الذرية. يمكن أيضاً معالجة الجنين مباشرة، خصوصاً منذ التقدم الحاصل في ميدان الإخصاب في الأنبوب ونقل الجنين FIVETTE. ولكن لم يحاول أي مختبر حتى الآن إدخال جينات داخل جنين بشري. فإلى متى سيبقى الأمر كذلك؟

يمكن لبعض الأمراض الشديدة الانتشار، كالأرجيّات والسكري ونقص المناعة وبعض الأمراض العصبية، أن تكون هي أيضاً ناتجة عن خلل في عمل الجينات. وإذا أصبح من الممكن تشخيص وجود مثل هذه الجينات قبل الولادة، فماذا سيكون موقف الأهل تجاه أطفالهم المعرّضين لبعض الأخطار؟ قد تَصلُح هذه التقنيات لزرع الجينات الحاملة لخصائص "مستحبّة". وإذا أصبح علاج الجينات أكثر سهولة فسيضطر بعض الأشخاص دون شك إلى طلبه بقصد المعالجة الملائمة... من الذي يقرر إذن إن كان الجين "صالحاً" أو "سيئاً"؟ وماذا عن الجينات الافتراضيّة للمقاومة الجسدية، أو الميل للعنف، أو الخضوع، أو إمكانية النوم لأربع ساعات فقط خلال الليل، أو الامتناع عن التدخين والخمر بسهولة؟ هل ستنادي المؤسسات، كما هو الشأن في الولايات المتحدة، بغربلة جينية لكي لا نوظّف إلا الأشخاص المهيئين أكثر من غيرهم لبعض الأعمال؟ هذا هو نوع الأسئلة الذي تطرحه علينا الجراحة الجديدة للجينات. إنها تفرض المزيد من الحكمة، حكمة العلماء والعامة على حد السواء.

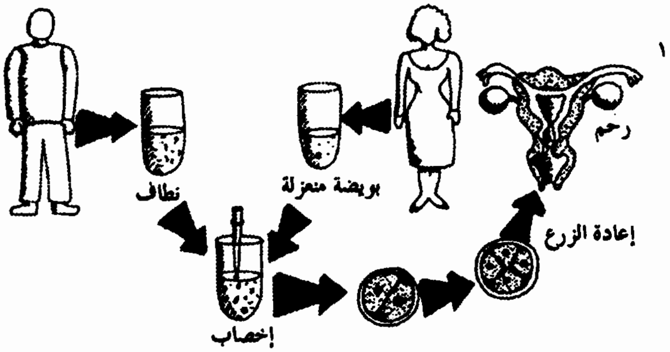
ولادات حسب الطلب

منذ بضع سنوات، ومع ولادة "أطفال الأنابيب"، مثل لويز براون سنة ١٩٧٨ والفرنسية أمندين سنة ١٩٨١، ونحن نواجه بعض المشاكل الإنسانية والاجتماعية والأخلاقية والقانونية واللاهوتية التي طرحتها الطرق الجديدة للإنجاب المراقب طبياً. ألسنا نتكلم اليوم عن "الإنجاب"؟ حتى أن مفاهيم جديدة ومحيّرة أصبحت تلاحقنا: تبرع "بالمني" و"البويضات"، التلقيح الإصطناعي، الإخصاب في الأنبوب، بنوك الأجنّة المجمّدة، نقل الأجنّة، أمهات وجدات حاملات، اختيار جنس المولود. وإلى يومنا هذا، تحقق ٧٠٠٠ إخصاب في الأنبوب في فرنسا ووُلد ١٠٠٠ طفل في مئات المراكز التي تمارس "الإنجاب" في بلادنا.

لازلنا نذكر قضية "پارپالي" Parpalaix التي أبهرت الجمهور سنة ١٩٨٤. إنها قضية سيدة شابة ترغب في أن تنجب بواسطة "شذرات" مجمّدة من مني زوجها المتوفى. تطرح هذه الحالة القصوى بكل وضوح مشكلة وهب الحياة بعد الموت ومشكلة بنوّة طفل يتيم شرعياً حتى قبل تكوّنه. لقد أظهرت هذه الحالة عدم تكيّف القانون مع تطور علوم الحياة. «فمن معرفة بالحياة، تصبح البيولوجيا سلطة عليها»، هذا ما كتبه روبرت كلارك Robert Clarke في كتابه **أبناء العلوم** *Les enfants de la science* الذي صدر في نفس الفترة. لقد عرف البيولوجيون كيف يحافظون على المني والبويضات والأجنة البشريّة المجمدة في مادة النتروجين السائل وكيف يلقّحون بويضة في الأنبوب. وهم يعلمون كيف يعيدون زرع جنين مؤلف من بضعة خلايا في رحم أم عاقر أو أم "حامل"، ويساعدون على اختيار جنس المولود باستعمال بعض الخصائص الفيزيائية للنِطاف...

يتمثل الهدف الأول للإخصاب في الأنبوب ونقل الأجنّة في

مساعدة الأزواج العاقرين على الإنجاب. لكن هذه التقنيات يمكن استعمالها من أجل أهداف أخرى. ولتلخيص مثل هذه القدرات ولتمكين كل فرد من أخذ الاحتياطات الكاملة، إليكم سلسلة من الرسوم المستوحاة من الرسوم المقترحة من قِبل جاك تستار Jacques Testart، رائد مشروع FIVETE "للإخصاب في الأنبوب ونقل الجنين" وأحد "آباء" أمندين، في كتابه **من الأنبوب إلى جنين مشهور** *De l'éprouvette au bébé spectacle:*

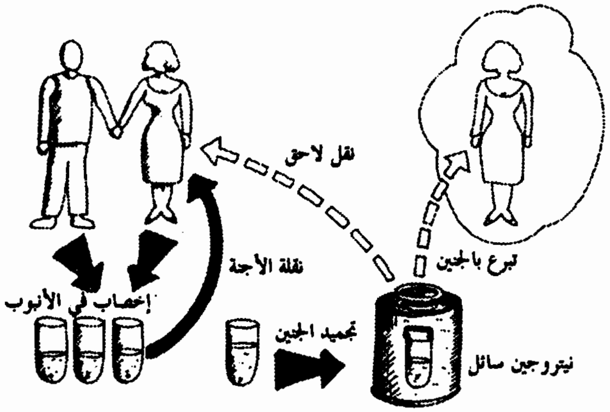


١ ـ يُعالَج مَنيّ الشخص الواهب ويُحضَّر بقصد الإخصاب في الأنبوب. بموازاة ذلك، توضع البويضات المأخوذة من الأم بهدف زرعها وحضنها. يحدث الإخصاب في الأنبوب. يُعاد زرع البويضة الملقّحة. تنقسم البويضة. بعدها، يُزرع الجنين في الرحم.

٢ ـ يُحفَظ أحد الأجنّة الناتج عن الإخصاب بالأنبوب على درجة حرارة منخفضة جداً بواسطة التجميد في النتروجين السائل. يمكن لهذا الجنين أن ينقل لاحقاً إلى رحم الأم أو إلى رحم الأم الحامل.

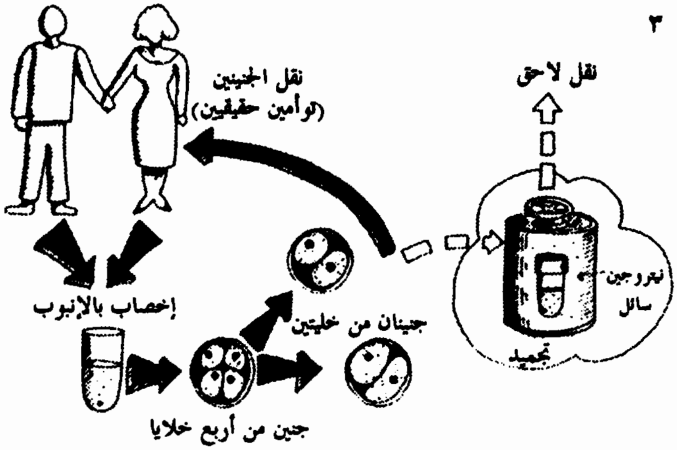
٣ ـ يمكننا نظرياً تكوين توأمين حقيقيين بالانقسام الاصطناعي لجنين من أربع خلايا، ما يولّد بدوره جنينين جديدين لكل منهما خليتان. يمكن إما نقل هذين الأخيرين

٢



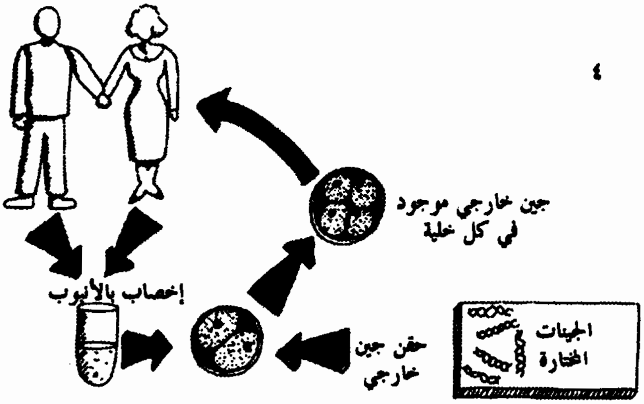
مباشرة إلى رحم الأم (أو الأم الحامل)، وإما تجميدهما إلى حين نقل لاحق.

٣



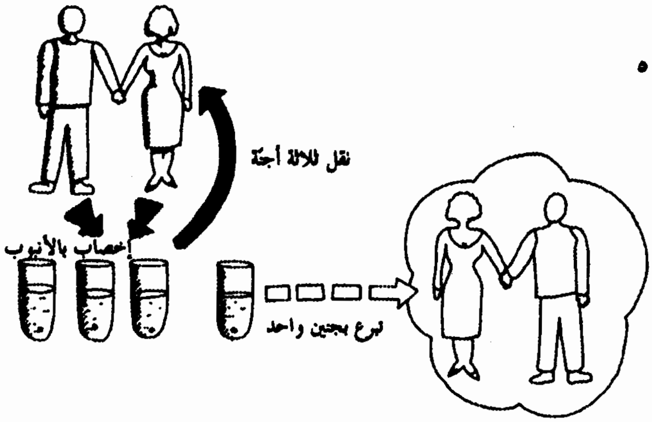
٤ ـ يكون ممكناً أيضاً تغيير الإرث الجيني للفرد بحقن جينات واردة من الخارج. مثل هذا الحقن يجب أن يحدث في مكان خاص بالبويضة الملقّحة. ويمكن استعمال هذه التقنية لإصلاح العيوب

٤



الجينية، وذلك بضم الجين "المصلِح" إلى الأدوات الجينية لكل خلايا الكائن الحي المتكوّن . وقد أجريت تجارب على الحيوانات، لكننا لم نتمكن بعد من التحكّم الدقيق في إدخال الجين الغريب في الصبغي، ولا بالتالي من التحكم في نشاطه.

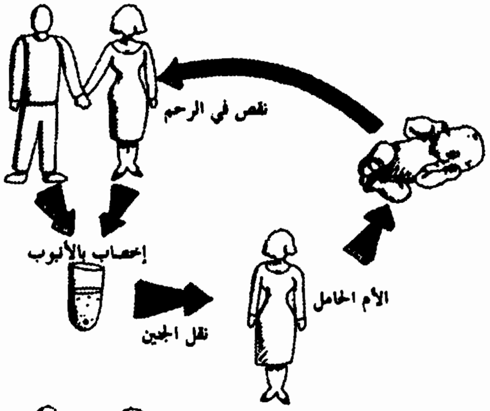
٥



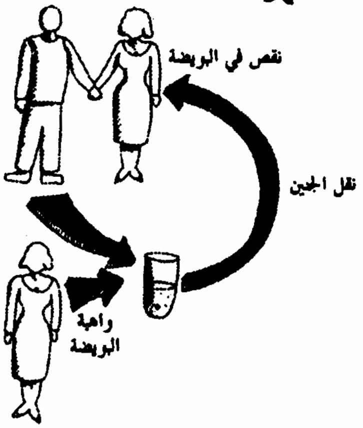
٥ ـ تُعتبر تنويعات "الإخصاب في الأنبوب ونقل الجنين" FIVETE كثيرة: التبرّع ببويضة مصدرها سيدة أخرى غير تلك التي تنتمي للزوجين طالبي الإخصاب؛ التبرع بجنين إلى زوجين آخرين؛ إعارة رحم، وهي حالة شائعة منذ الآن في صفوف "الأمهات الحوامل" (الرسمان التاليان).

تسمح بعض الحالات الحقيقية أو الناتجة عن تجارب قابلة للتطبيق بقياس ضخامة المشاكل الأخلاقية والقانونية التي تطرحها اليوم القدرات الجديدة للبيولوجيا:

٦



٧



تسمح التقنيات الجارية منذ الآن على الحيوان بانقسام بويضة ملقّحة إلى اثنتين، ومن ثم إنجاب التوائم. هل يمكن تجربة هذه التقنية على جنين بشري؟ ولمن ينتمي النصف الثاني؟ هل للعلم أن يمتلك مستقبله؟ هل لهذا الجنين حقوق؟ هل يمكن للقانون أن يحميه مثل أي شخص يحتاج إلى المساعدة؟ وهناك أمر أكثر دقة أيضاً: لنتصور أن النصف الأول من البويضة بعد انقسامها قد أعطى، بعد زرعه، ولادة فتاة إسمها سيلفي. ثم بعد ثماني عشرة سنة، أعيد زرع النصف الثاني (المجمّد طوال هذه المدة) في رحم سيلفي. تلد سيلفي طفلة اسمها باتريسيا فتكون في نفس الوقت إبنتها وأختها التوأم.

في سنة ١٩٨١، ذهب زوجان أميركيان عاقران إلى أستراليا (حيث تمّ تطبيق أولى تجارب الإخصاب في الأنبوب) أملاً في أن يكون لهما طفل. أخذ الأطباء ثلاث بويضات جرى تلقيحها. نتج عن البويضة الأولى، بعد إعادة زرعها، إسقاط. وبعد تجميد البويضتين الأخريين، رجع الزوجان إلى الولايات المتحدة حيث توفيا إثر حادث طائرة سنة ١٩٨٣ وتركا ثروة كبيرة. ما هو مصير الأجنة؟ لقد حكم القانون بإتلافها. تلقّى الأطباء الأستراليون العديد من العروض من نساء يأملن في الحمل بهذه الأجنة لإنجاب أطفال أثرياء منذ ولادتهم. ولكن ما هي حقوق الورثة إذا كان مصدر المني الملقّح في البويضات شخص متبرع وليس الزوج؟

سؤال آخر محيّر بالخصوص: ما هو تأثير ذلك على التوازن السكاني العام في اختيار جنس المولود بطرق جد سهلة ومنتشرة مثل "اختبار الحمل"؟ يوجد اليوم نوعان من التقنيات التي تسمح بالتدخّل قبل الإخصاب أو بعده. تسمح التقنية الأولى، التي طورت في مختبرات يابانية وأميركية، بفرز النطاف الحاملة للصبغي Y (الذي يعطي ذكوراً) والأخرى الحاملة للصبغي X (الذي يعطي إناثاً). ولهذا

الغرض، نستعمل أوساطاً بيولوجية خاصة يجمع فيها مَنيّ المتبرع. "تسبح" النطاف الحاملة للصبغي Y، والأكثر ثقلاً، بسرعة كبيرة ولمدة أطول من تلك التي تنتج إناثاً. وذلك ما يسمح بفصلها بطرق متنوعة ومن ثم تحقيق الإخصاب في الأنبوب. هذه الطريقة، التي تعتبر أقل وثوقية من غيرها، لا زالت موضع جدل على الصعيد العالمي. أما التقنية الثانية، التي طورت في المختبرات الفرنسية والبريطانية، فلقد أجريت على أجنة تتراوح أعمارها بين ٤ و٨ أيام بعد إخصابها بالأنبوب. نأخذ خليّة ونبحث عن وجود الصبغي Y فيها باستعمال "المسابير" الجينية ثم نعيد (أو لا) زرع الجنين داخل الرحم.

لقد كانت هذه التقنيات مصممة في الأصل لتفادي انتقال الأمراض الجينية المرتبطة بالجنس، مثل الناعور. ولكنها ستتعمم فتصبح أكثر فأكثر سهولة ونجاعة. ففي الولايات المتحدة، سبق لشركة غامتريكس Gametrics أن اقترحت على أساس تجاري طريقة اختيار جنس المولود. ثم قامت ببيع ترخيص الطريقة التي اخترعها رونالد إريكسون Ronald Ericsson إلى مئات المصحّات في العالم. وبطبيعة الحال، يجب مراقبة انتشار مثل هذه الطرق، لا سيما وأن بعض بلدان تشجع أكثر على إنجاب الصبيان.

جينات على الخريطة

يوجد في قلب خلايانا مكان مجهول، ألا وهو بنك المعلومات الذي يدير عمل جسمنا: "المجين" الذي يمثّله كامل حمض الديوكسي ريبونوكلييك الخاص بنا. في سنة ١٩٨٧، قرر البيولوجيون رسم خريطة لهذا المكان. إنه "مشروع أبولو" الجديد في البيولوجيا. وهو عبارة عن برنامج عظيم ذي أبعاد عالمية ليس الهدف منه إلا فكّ رموز البرنامج الجيني للكائن البشري برمته. كانت المهمة جسيمة ولكن على قياس المردودات المنتظرة بالنسبة للبحوث

الأساسية والطب، وكذلك بالنسبة للصناعة وخصوصاً التقانة الحيوية.

يحتوي البرنامج الجيني البشري، كما رأينا، على ما يعادل ٣ مليارات من السمات أو الحروف. في سنة ١٩٨٥، لم نكن نجيد "قراءة" هذه المعلومة الجينية إلا بالتقنيات اليدوية بسرعة ١٠٠٠ قاعدة في السنة وللشخص الواحد. ومع ظهور الجهاز المسلسل المجهري microséquenceur الذي وهو آلة أوتوماتية ابتكرها الباحث الشاب الكاليفورني ليروي هود Leroy Hood ومؤسسة أبلايد بيوسستمز Applied Biosystems، حصل انقلاب في الأوضاع. فقد بات بالمستطاع "قص" حمض الديوكسي ريبونوكلييك (دنا) بسرعة ١٠٠٠٠ قاعدة في اليوم. ورغم ذلك... وحتى وإن توصلنا إلى سرعة قياسية لعدد القواعد في الثانية، سوف تتطلّب ٣ مليارات من أزواج القواعد الموجودة في المجين البشري ١١٠ سنوات لقراءتها! وإذا وضعنا العديد من هذه الآلات والفرق بشكل متواز، نتوقع أن يتمكن ٣٠٠ شخص من إتمام هذه المتوالية خلال ٢٠ سنة بكلفة تعادل مليارين أو ٣ مليارات من الدولارات. لقد اجتمع مؤخراً العديد من الفرق العلمية ـ خصوصاً في باريس خلال شهر سبتمبر / أيلول ١٩٨٧ تحت راية INSERM ـ للبحث عن موارد لتمويل المشروع وتنظيم التنسيق ما بين المختبرات. ولكن المنافسة بين الأميركيين والأوروبيين واليابانيين كانت قد بدأت. وهذا المشروع الهائل لم يستهوِ فقط الباحثين بل الصناعيين والمسؤولين عن المنظمات العامة أيضاً. وقد نجح عدد من العلماء المرموقين في تحويل وجهة طموحاتهم إلى هدف قابل للتحقيق: ألا وهو رسم "خريطة جينية" خاصة بالإنسان حسب متواليات تبدأ من ٤٠٠٠٠ إلى مليون من أزواج القواعد، وذلك انطلاقاً من المناطق المميّزة التي اكتشفت في الصبغيات البشرية. ستكون هذه الخريطة التي تعطينا معلومات ثمينة قابلة للتحقيق خلال ٣ إلى ٥ سنوات على أيادي ٣٠ عالماً وبكلفة أكثر معقولية تتراوح بين ٣٠ و٣٠٠ مليون

دولار. في الأثناء، تهدّد كمية المعلومات المنتجة بطرح بعض المشاكل. ذلك أن متواليات الجينات المحلَّلة تُخزن في ذاكرة الحواسيب الكبرى. وتبيّن أن كمية المعلومات الأساسية التي يمكن الوصول إليها عبر الشبكات في العالم كله خلال بضع سنوات سوف تتضاعف أكثر من ٢٥ مرة. هذا ما يطرح مشكلة ذات أهمية فيما يتعلق بتسجيل المعلومات وتحديثها.

بماذا يفيدنا وضع خريطة لجينات الإنسان؟ أولاً في الحصول على فهم أفضل لبعض مراحل عمل خلايانا: التكاثر والتمايز والشيخوخة. ثم في تحليل تفصيلي لمتواليات الجينات التي تلعب دوراً هاماً في العديد من الاضطرابات الاستقلابيّة أو الأمراض الخطرة: ارتفاع ضغط الدم، السرطان، الأمراض الجينية، أمراض القلب الوعائية، الأمراض المناعية، وحتى الامراض العصبية. وبفضل الخريطة الجينية يمكننا تعيين وفرز وربما تغيير هذه الجينات المعتلّة. في عام ١٩٨٧، أسس والتر جيلبرت Walter Gilbert، الحائز على جائزة نوبل، مؤسسة للتقانة الحيوية اسمها "جينوم كوبوريشن" Genome Corporation، لتحليل مجموعة من الجينات البشرية في أقل من عشر سنوات، ثم لبيع حقوق استعمال هذه الخريطة الجينية للمؤسسات التي تطلبها. إنها نوع من **حقوق تأليف** الحياة التي سبق وأثارت الكثير من الجدل في الأوساط العلمية والصناعية. ومن شأن تأسيس مثل هذه المكتبة التامة من جينات الإنسان أن يخلف بدون أدنى شك آثاراً عميقة أخلاقية وفلسفية.

يعتبر التعرف على الأشخاص بواسطة "بصماتهم الجينية" أحد مجالات التطبيق المباشر لبعض تقنيات البحث عن المعلومة داخل "بنك المعطيات" التابع لجينات الإنسان. ففي ١٣ تشرين الثاني / نوفمبر ١٩٨٧، سجّل التاريخ اسم رجلين هما روبرت ميلياس Robert Melias، المتهم في مدينة بريستول بإعتداء جنسي والذي

أمكن التعرف عليه بفضل بصماته الجينية، وأليك جيفريز Alec Jeffreys من جامعة ليستر Leicester، مخترع الطريقة التي ساهمت بالقبض عليه. هذه الطريقة ستطيح بطريقة بصمات اليد التي اكتشفها ألفونس بارتيّون Alphonse Bartillon سنة ١٩٠١، كما ستحدث ثورة في عالم الإجرام، وفي البحث عن الأبوّة، وفي إجراءات الهجرة، لأنها تمكّن من التعرف بدون أدنى شك على الفرد بمعدل خطأ لا يتعدى واحد على ٣٠ مليار.

لتحقيق "بصمة جينية"، ننطلق من بعض الخلايا المرتبطة مثلاً بجذر شعرة واحدة، أو قطرة دم (حتى وإن كانت قديمة منذ عدة سنين)، أو بعيّنة من الجلد، أو بعيّنة من المنيّ. ما هو مبدأ الاختبار؟ لقد رأينا أن كل المعلومة الجينية للشخص يمكن أن تخزن في ١٠٠٠ موسوعة من ١٠٠٠ صفحة، بحيث تحتوي كل صفحة على ٣٠٠٠ حرف (انظر ص ٢٢٨). لنتصوّر أن هناك ١٠٠٠ صفحة متشابهة موزعة على جميع الموسوعات تكوّن هذه الكدسة الضخمة. تمثّل هذه الصفحات جينات تتجدد في نسق متغير حسب الأشخاص. هذا التوزّع في الصفحات ضمن مجموعة الموسوعات هو الذي يخص كل شخص، وهو التوزّع الذي يوضحه هذا الاختبار. كيف يمكن تحقيقه بصفة متكرّرة في المختبر؟ نفصل أولاً حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك من العيّنة ثم نقطّعه مع الأنزيمات (انظر ص ٢٣٠). بعد ذلك نختار بعض القطع الكبيرة من حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك (ما يعادل "صفحات" متشابهة من الموسوعات) ونتعرّف إليها بواسطة المسابير الجزيئية الموسومة بـ"علامة" مشعّة، وأخيراً نطرحها على هلام بشكل اشرطة. يعتبر توزّع هذه الأشرطة ميزة لكل فرد. هكذا نفهم منافع البصمات الجينية. ولكن سيكون من الضروري في المستقبل تفادي الأخطاء والإفراط. من هنا تظهر أهمية وضع قانون يحمي حقوق الأشخاص.

خلاصة

تعوّد جاك مونو أن يقول إنه بعد اكتشاف حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك والرمز الجينيّ هناك سؤالان ينبغي على البيولوجيا أن تطرحهما من الآن فصاعداً، وهما أصل الحياة ووظيفة الدماغ البشري. هذه الرحلة في عمق الحياة حوّلتنا إلى باحثين في اللامتناهي في الصغر، مسطّرين بذلك طريق الحياة الذي يبدأ من أصلها وينتهي إلى تغيّره بواسطة عقل الإنسان.

يندمج هذا العقل اليوم في شبكة أقمار من الاتّصالات. فعندما نرسم تاريخنا الخاص سنكتشف أننا جزء من كائن حي ضخم هو كوكب الأرض، مهدنا وملجأنا وشريك حياتنا. يعتمد مستقبلنا من الآن فصاعداً على قدرتنا على التحكّم في الأرض لكي نحافظ على الحياة في جميع أشكالها. لذلك يبدو ضرورياً إعلام أكبر عدد ممكن من غير المختصين بمجازفات البيولوجيا الكبرى وبوحدة العالم الحي. هنا يكون دور وسائل الإعلام وتعاونها مع العلماء ضرورياً. وذلك بغية المساعدة على الاختيار والتوجّه والتعايش مع البيولوجيا الحديثة التي سوف تشكّل نهاية القرن وبداية الذي يليه، ربما أكثر مما حققه أي علم آخر حتى الآن. وانطلاقاً من معرفة مشتركة، يمكن تأسيس حوار وتفكير حول المظاهر الأساسية والاستراتيجية والأخلاقية والفلسفية للأبحاث البيولوجية.

إن تقدم التقنيات وازدهار صناعة الحياة يجعلنا بحاجة ماسة إلى مثل هذا النوع من الحوار. فالتدخلات الممكنة للباحثين في مجالات الدماغ، أو الأجنّة أو الجينات تفرض "زيادة في الروح". يساعد رسم خرائط الجينات البشرية على تجميع الطاقات والمهارات حول

أحد أكبر البحوث التي تهم الإنسان : ألا وهي فهم طريقة عمل جسمه. هكذا تمكنت البيولوجيا من الوصول إلى حيث كانت توجد الفيزياء منذ نحو عشرين أو ثلاثين سنة. والحال أنه إذا كنا نعلم إلى أي حد مكّنتنا المشاريع الكبرى العالمية والمعدّات الثقيلة من التقدم في معرفة المادة، صار بإمكاننا أيضاً تقدير مخاطر بعض تجارب الفيزياء مثل القنبلة الذرية. لذلك يحثنا التقدم السريع في البيولوجيا على توخي مزيد من الحذر.

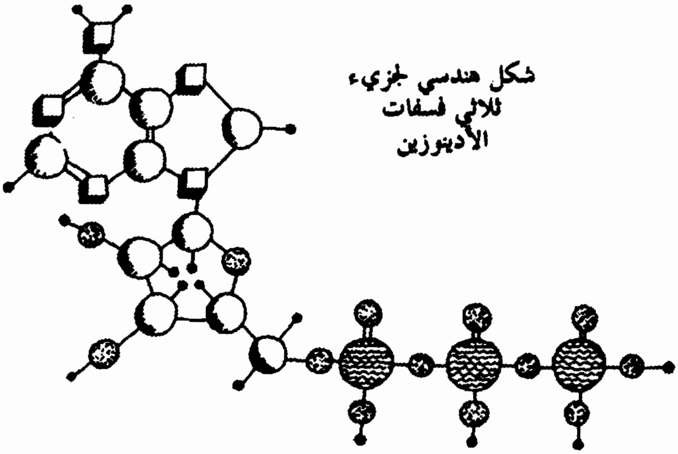
في المستقبل القريب، سوف تطرح البيولوجيا كذلك مشكلات من الناحية الاجتماعية - السياسية. وبالفعل، فإن تقدم البيولوجيا الجزيئية يفتح المجال لفهم أفضل للسرطان ومسار الشيخوخة. هل يؤدي العلاج الأحسن لهذا المرض الخبيث والتحكّم الجيد في الشيخوخة إلى مجتمع تسوده أغلبية من "الجيل الثالث"؟ وهل سيكون هنالك توازن ما بين الفئة النشطة والمتقاعدين؟ هذه الأسئلة تتجاوز المعقول أو الأخلاق وتطرح مشاكل اجتماعية حقيقية.

عقب هذه الرحلة في قلب الحياة، كنا نطرح ثلاثة أسئلة: ما هي الحياة؟ من أين تأتي الحياة؟ وإلى أين تمضي الحياة؟ هذه الأسئلة لم تجد أجوبة نهائية ولكنها تتوضح فيما بينها وتساعدنا في معرفة أحسن لأنفسنا. وها نحن الآن في مواجهة مع مراقبة ومع حماية الحياة على وجه الأرض. ولكن ميدان المراقبة هذا محدود جداً مقارنة بعظمة الكون. ويبقى العديد من الأسئلة معلّقاً: لماذا هذا التطور الخاص دون غيره؟ هل توجد الحياة في مكان آخر؟ أي الأشكال يمكن أن تتّخذه؟ يبدو كوكبنا، إذا ما شاهدناه من قمر اصطناعي، كالخلية الحية أو البيضة الملقحة، محمّلاً بكل مؤهلات الحياة، أو كالجنين في مشيمته، أو كعمل فني ينبغي المواظبة على إنجازه. نحن ورثة الكائن الحي. فلنحسن استعمال مثل هذه الحرية.

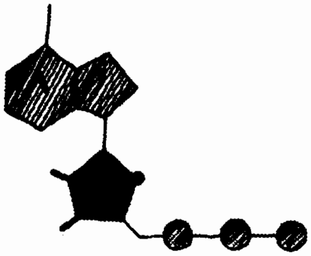
الملاحق

الملحق ١

جزيء ثُلاثِي فُسفاتِ الأَدِينُوزِين في شكل قطع مفكوكة(*)



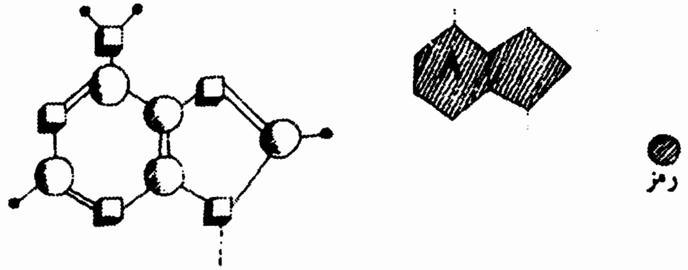
شكل هندسي لجزيء
ثلاثي فسفات
الأدينوزين



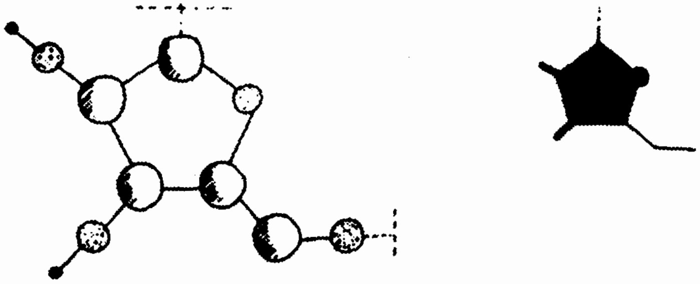
مثلما فعلنا بالفيروسات، لنفكّك هذا الجزيء قطعة قطعة.

(*) في هذه الرسوم لا يتم تبيين ذرّات الهيدروجين دوماً، وذلك لتفادي إثقال الرسم.

١. يسمى "رأس" الجزيء أدينين.



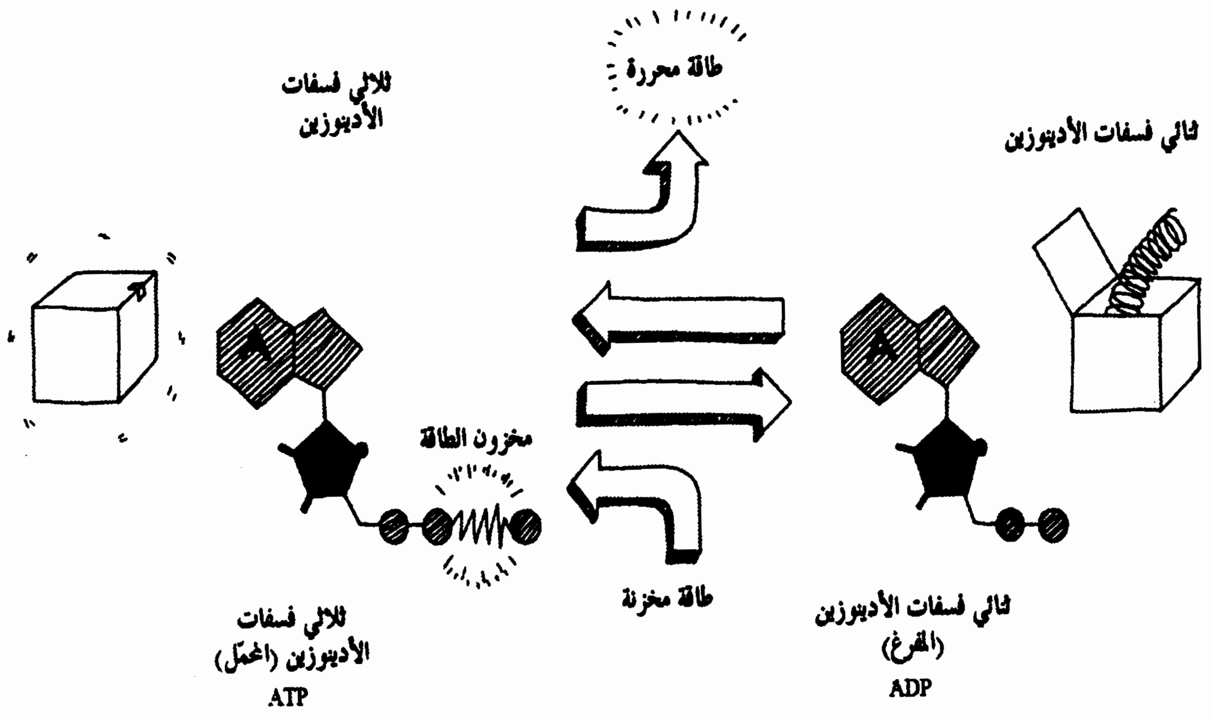
٢. جسم الجزيء هو الريبوز. وهو كالغلوكوز، مادة كيميائية من عائلة السكريات.



٣. "الرأس" و"الجسم" يكوّنان جزيئاً جديداً يسمى أدينوزين.

٤. أخيرا يتكوّن "الذنب" بترابط ثلاث جزيئات من حمض الفوسفوريك (ثُلاثِيُّ الفُسفات).

في هذا الترابط الذي يجمع مجموعات الفسفات الثلاث - مكوّناً ذنب "الجزيء" - تختزن الطاقة. يؤدي فصل الترابط النهائيّ إلى إطلاق كمية لا بأس بها من الطاقة التي تستعملها جميع الخلايا في حالة الحاجة المباشرة. وهذا ما يبينه الرسم التالي.


ثالي فسفات الأدينوزين
طاقة محررة
ثلاثي فسفات
الأدينوزين
مخزون الطاقة
طاقة مخزنة
ثالي فسفات الأدينوزين
(المفرغ)
ADP
ثلاثي فسفات
الأدينوزين (المحمّل)
ATP

الملحق ٢

الجزيء الضخم لحَمْض الديوكسي ريبونوكلييك

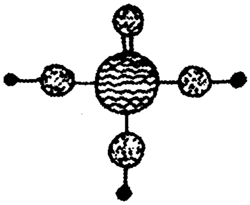
في شكل قطع مفكوكة

ماهي المكوّنات الكيمائية للّولب المزدوج لحَمْض الديوكسي ريبونوكلييك ؟ لمعرفة ذلك، استعمل الكيميائيون الطريقة الجذرية المسماة بالحَلْمَهَة *hydrolyse* (قطع مائي). تُمكّن هذه الطريقة من تفتيت الجزيء الضخم إلى قطع صغيرة نستطيع بالتالي تحليلها. سنحقق هذه العملية، من ثم نعيد تكوين حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك انطلاقاً من هذه المركّبات.

لقد تم التعرض لبعضها في السابق.

يبين التحليل أنّ لحَمْض الديوكسي ريبونوكلييك (دنا) ستة أجسام كيمائية مختلفة:

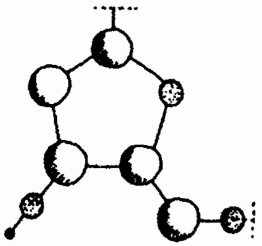
١. الأول هو حمض الفوسفوريك(*)، مشابه تماما للذي تعرضنا له بجزيء ثُلاثِي فُسْفاتِ الأَدِينُوزِين والذي منه يتكوّن "الذنب" (انظر ص ٢٧٠).



حمض الفوسفوريك

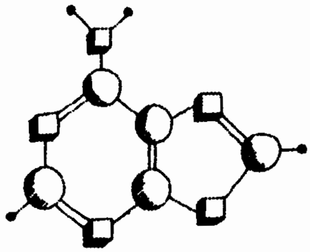
(*) بسبب وجود حمض الفوسفوريك هذا، سمّي حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك حمضا نووياً.

٢. أمّا الثاني فهو قريب جداً من الريبوز الذي يكوّن "جسم" جزيء ثُلاثِي فُسْفاتِ الأَدِينُوزِين. فمنَ الريبوز، تنقص ذرة أكسجين. فنسميّه ديوكسي ريبوز(*) ("ديوكسي" بمعنى منزوع الأكسيحين).



الديوكسي ريبوز

٣. ثالث المركبات الكيمائيّة هو الأدينين (A) الذي يكوّن "رأس" ثُلاثِي فُسْفاتِ الأَدِينُوزِين: انظر ص ٢٧٠).



الأدينين

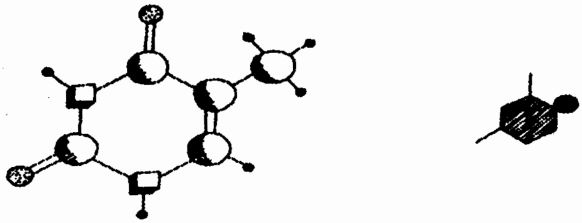
أخيراً المركبات الثلاث الأخرى التي لم نتعرض لها بعد هي:

٤ .الثيمين (T) **thimine**.

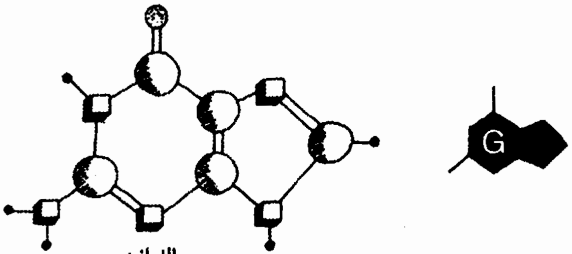
٥ .الغوانين (G) **guanine** الذي يمت بصلة إلى الأدينين.

٦. والسيتوزين (C) **cytosine**

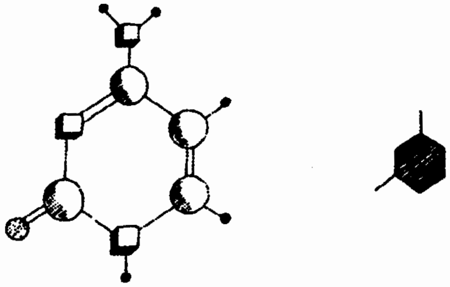
(*) نفهم الآن معنى الحروف الأولى للكلمات التي تكوّن حمض الديوكسي ريبونوكلييك: حمض ديوكسي ريبي - نووي.



الثيمين



الغوانين

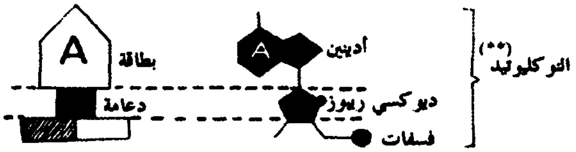


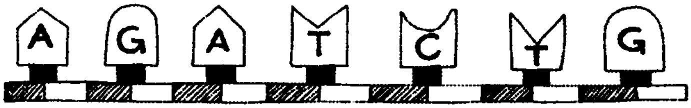
السيتوزين

الأدينين والثيمين والغوانين والسيتوزين هي قواعد (الضد الكيمائي للحمض)، نسميها **القواعد الأربع لحَمْض الديوكسي ريبونوكلييك**. إن تنظيم هذه الجزيئات الأربع الأساسية هو الذي يكوّن الرمز الجيني المختفي ضمن قلب حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك.

يمكننا إعادة تكوين الجزيء الضخم (كما هو مبيّن في الرسم ص ٧٥) انطلاقاً من القطع المفكوكة الست.

إن اتحاد **القاعدة، الديوكسي ريبوز** (أو الريبوز)، **والفسفات** مهم جداً: فهو يكوّن **النوكليوتيد**، وحدة بناء من خلالها تُشيّد جميع الجزيئات الضخمة لحَمْض الديوكسي ريبونوكلييك (دنا) ولحَمْض الريبونوكلييك (رنا)(*). يكافئ النوكليوتيد وحدة البناء الضرورية لصنع نموذج ميكانيكي لحَمْض الديوكسي ريبونوكلييك (دنا) (انظر ص ص ٧٧ ـ ٨٢).

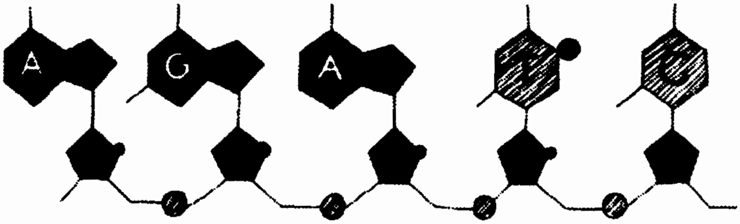




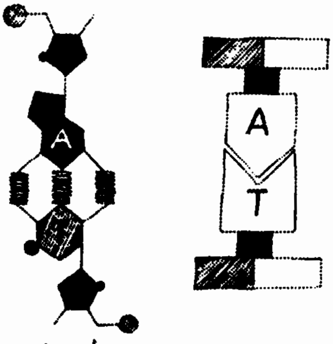
ومثلما يبيّنه الرسم التالي، ترتبط النوكليوتيدات ببعضها البعض لتشكّل أحد دعائم "سلم" حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك (دنا) (يحدث التعلق بفضل الطاقة المحبوسة بداخل "ذنب" النوكليوسيد على شكله ثُلاثِيُّ الفُسفات).

(*) حَمْض الريبونوكلييك هوحمض الريبي ـ النووي (لأنه يحتوي على الريبوز وليس على الديوكسي ـ ريبوز)

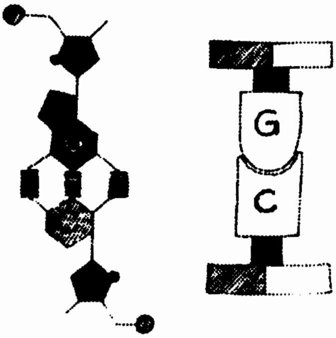
(**) حتى نكون دقيقين أكثر، يجب أن نقول ديوكسي- نوكليوتيد لأنّ السكّر هو ديوكسي- ريبوز. نحن نقصد هنا (ديوكسي نوكليوسيد أحاديّ الفسفات) (أساس+سكر+نوكليوسيد). كل القواعد (U,T,G,C,A) تعطي نوكليوتيد أحادي، ثنائي، ثلاثي الفسفات (ثُلاثِي فُسفاتِ الأدِينُوزين، ثلاثي فسفات السيتيدين، ثلاثي فسفات الغوانوسين، ثلاثي فسفات الثيمين ، ثلاثي فسفات اليوريدين). والنوكليوسيد أحادي الفسفات هو نوكليوتيد.



للقواعد الأربع أشكال إضافيّة تمكّنها من أن "تتعلّب" الواحدة في الأخرى؛ تماماً مثل بطاقات النماذج. فهي تندمج حسب الأزواج: **الأدينين (A) يرتبط دوماً بالثيمين (T)، والغوانين (G) بالسيتوزين (C).**



زوج أدينين–ثيمين

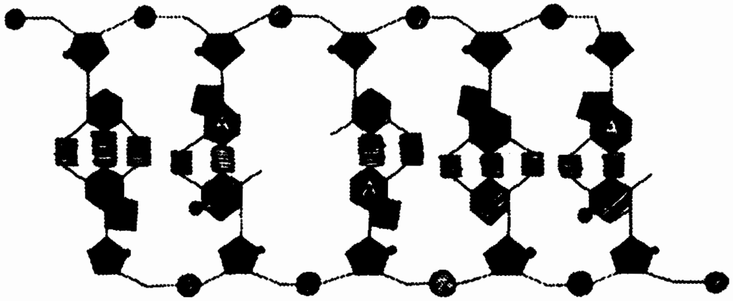


زوج غوانين– سيتوزين

تتعلق الأزواج الأساسية (A-T وG-C) ببعضها بواسطة ترابط ضعيف تستطيع أن تنموَ وأن تنفكّ بسهولة. يُكسب مجموعها كاملَ بناء الجزيء الضخم صلابة شديدة.

البنية الكيمائيّة لجزيء حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك (دنا) المكروي

هكذا نستطيع ، انطلاقاً من هذه النوكليوتيدات الأربعة، إعادة تكوين الخيطين اللذين يكونان جزيء حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك (دنا). تكوّن جزيئات الديوكسي ريبوز والفسفات هيكل البناء، في حين أنّ "المرسال" الذي تحبسه يكون مسجّلاً في تعاقب المتواليات A-T وG-C.



تفصيل أخير: بسبب الزاوية الفراغية التي تشكلها بعض الروابط الكيمائية، يكون "سلم" حَمْض الديوكسي ريبونوكلييك (دنا) غير مُسطّح، ولكنه في الحقيقة ملويّ حول المحور المركزي مثلما يبيّنه الرسم أعلاه:

عند عملية التضاعف ـ الذي يحدث حسب آلية مطابقة للتي

ذُكرت بعد رسوم الصفحات ٧٧ ـ ٨٠ ـ تتفكّك الترابطات الواحدة تلو الأخرى، في حين أن اللولب المزدوج ينتشر بالالتفاف حول نفسه، فيعطي كل ليف لولباً مزدوجاً وليداً بفضل قطع التركيب الموجودة في الوسط المحيط.

الملحق ٣

تفاعل التخمير

ماذا يحدث على مستوى الجزيئات؟

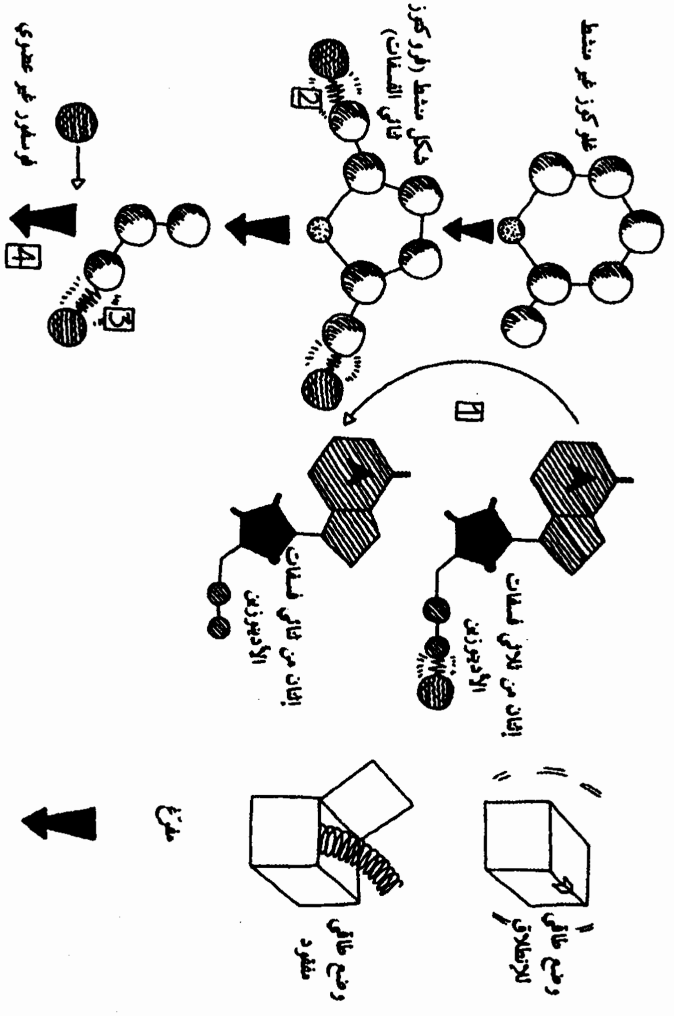
إنّ الرسم السابق مبسط جداً. في الحقيقة يوجد أحد عشرة مرحلة، كل واحدة منها محفَّزة بأنزيم مختص.

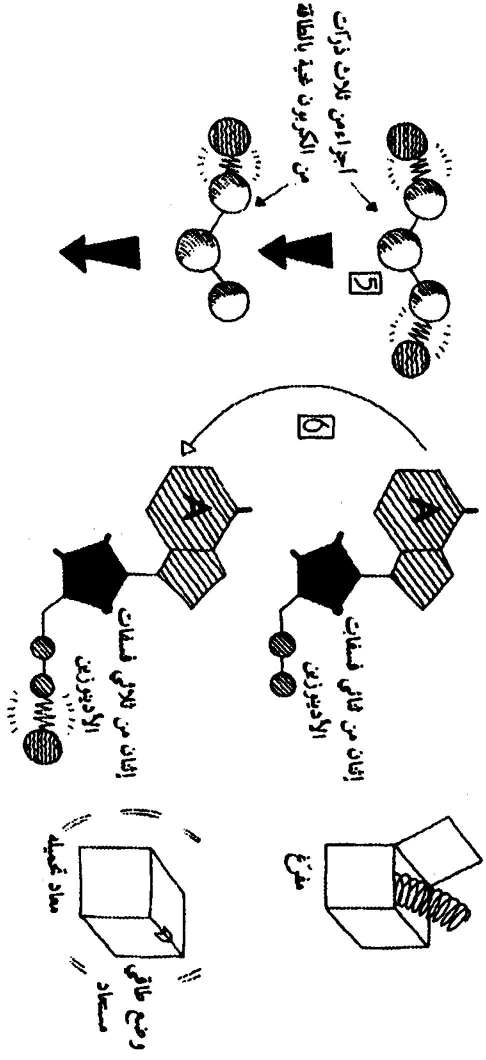
يُنشّط جزيء الغلوكوز بواسطة جزيئين من ثُلاثِي فُسْفاتِ الأَدِينُوزِين يتفرّغان في شكل اثنين من ثُنائِيُ فسفات الأدينوزين (١). الشكل الجديد المنشّط هو فروكتوز ثنائي الفسفات (٢). يتفكك هذا الجزيء إلى قطعتين مكونتين من ثلاث ذرات من الكربون(٣). (من الآن فصاعداً يجب إذن الضرب باثنين. من أجل التبسيط فقد عرضنا سلسلة واحدة، ولكن يوجد في الواقع سلسلتان متوازيتان.) تتفاعل كل قطعة من ثلاث ذرات من الكربون مع الفسفور غير العضوي الموجود في الوسط (٤). هذا الجزء الغني بالطاقة (٥) سيساعد على إعادة تحميل ثُنائِيُ فسفات الأدينوزين الذي يتحوّل عندئذ إلى اثنين من ثُلاثِي فُسْفاتِ الأَدِينُوزِين (٦): يُسترجع الوضع الطاقيّ للانطلاق. يُحمّل جزيئان آخران في شكل ثُلاثِي فُسْفاتِ الأَدِينُوزِين: يكون الكسب الخاص اثنين من ثُلاثِي فُسْفاتِ الأَدِينُوزِين (٧).

بعد خسارة آخر ذرة فسفات، يبقى جزءاً من ثلاث ذرات من الكربون (حمض البيروفيك) (٨). يتفتت أخيرا إلى جزء من ذرة واحدة من الكربون: أكسيد الكربون (٩)؛ وإلى جزء من ذرتين من الكربون: كحول إيثيلي (١٠).

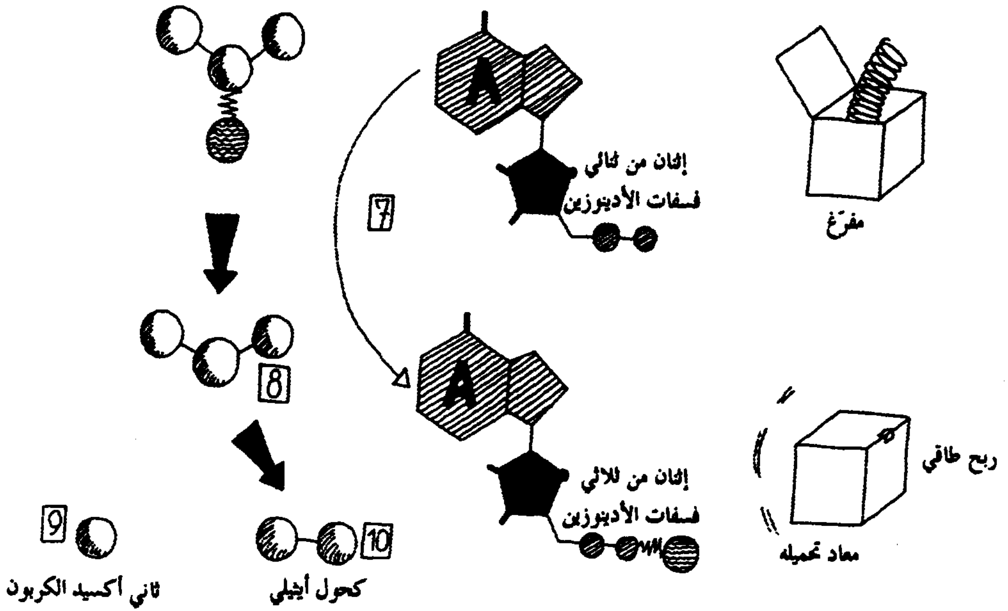
تمثل الطاقة المستفاد منها، والمحبوسة في ذرتين من ثُلاثِي

فُسفاتِ الأَدِينُوزِين، ٢٠٠٠٠ حريرة. (الحريرة هي مجموع الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة غرام واحد من الماء درجة واحدة). يساوي المردود النهائي ٣٪





أجزاء من ثلاث ذرات
من الكربون غنية بالطاقة
5
6
A
A
إثنان من ثنائي فسفات
الأديونزين
إثنان من ثلاثي فسفات
الأديونزين
مفرّغ
وضع طاقي
مستعاد
معاد تحميله



إثنان من ثنائي
فسفات الأدينوزين
مفرّغ
7
إثنان من ثلاثي
فسفات الأدينوزين
ربح طاقي
معاد تحميله
8
9
10
كحول أثيلي
ثاني أكسيد الكربون

المـراجـع

Antebi, E., Fishlock, D., *Le Génie de la vie*, Éditions Hologramme, 1985.
Atlan, H., *L'Organisation biologique et la Théorie de l'information*, Hermann, 1972.
Barbacid, M., « Mutagens oncogenes and cancer », *Trends in Genetics*, 2, 1986, p. 244.
Bertalanffy, L.von, *Théorie générale des systèmes*, Dunod, 1973.
Brillouin, L., *La Science et la Théorie de l'information*, Masson.
Buvet, R., *L'Origine des êtres vivants et les Processus biologiques*, Masson, 1974.
Cairns-Smith, A., « Solid-state life of vital mud », *New Scientist*, 18.XI.1982, p. 453.
Calvin, M., « L'origine de la vie », *La Recherche*, 41, 1.I.1974, p. 44.
Cech. T. R., *The chemistry of self-splicing RNA and RNA enzymes*, *Science*, 236, 19.VI.1987, p. 1532.
Changeux, J. P., *L'Homme neuronal*, Fayard, 1983.
Clarke, R., *Les Enfants de la science*, Stock, 1984.
Cloud, P., « How life began », *Nature*, 296, 18.III.1982, p. 198.
Cowen, R., « The cosmic cradle », *Technology Review*, mars 1978, p. 6.
Crick, F., « Panspermia with purpose and intent », *New Scientist*, 13.V.1982, p. 435.
Crick, F., *Of molecules and men*, Washington Press, 1966.
Danchin, A., *L'Œuf et la Poule*, Fayard, 1983.
Danchin, A., « L'origine de la vie », *La Recherche*, juin 1988.
Darbon, P., Robin, J., *Le Jaillissement des biotechnologies*, Fayard-Fondation Diderot, 1987.
Dayhoff, M. O. et coll., « Nucleic acid sequence bank », *Science*, 209, 1980, p. 1182.
Delattre, P., *Système, Structure, Fonction, Évolution*, Maloine-Doin, 1971.
Dickerson, R.E., « L'évolution chimique et l'origine de la vie », *Pour la science*, 13, 1978, p. 26.
Dixon, B., *Invisibles alliés*, Temple Smith LTD, Londres, 1976.
Douzou, P. et coll., *Les Biotechnologies*, PUF, coll. « Que sais-je ? », 1983.
Edman, P., Beeg, G., « A protein sequanator », *Euro. J. of Biochemistry*, 1967, p. 80.
Eglinton, G. et coll., « Cosmochemistry and the origine of life », *Nature*, 292, 20.VIII.1981, p. 669.
Eigen, M. et coll., *The hypercycle-A principle of natural self-organization*, Springer-Verlag Berlin, 1979.

Eigen, M., « Molecular self-organization and the early stages of evolution », *Quarterly Rev. of Biophys.*, 4, 1971, p. 149.
Fox, J., *Copolymer proposed as vital to evolution*, C & EN, 3.VII.1978, p. 17.
Fox, S., Dose, K., *Molecular evolution and the origin of life*, New York, Marcel Dekker.
Gilbert, W., « The RNA World », *Nature*, 20.11.1986, 319, 618.
Goeddel, D. V. et coll., *Expression in E. Coli of Chemically synthetized gene for hum. insulin*, 1979, p. 106.
Goeddel, D. V. et coll., « Direct express. in E. Coli of a DNA sequence coding for human growth hormon », *Nature*, 1979, 281, p. 544.
Gribbin, J., *Carbon Dioxide, Ammonia — and life, New Scientist*, 13.V.1982, p. 413-414.
Gros, F., *Les Secrets du gène*, Éditions Odile Jacob, 1986.
Hagene, B. Lenay, C., *Aux origines de la vie*, Hachette-Fondation Diderot, 1986.
Hargreaves, W. R., « Synthesis of phospholip ids and Membranes in prebiotic conditions », *Nature*, 266, 3.III.1977, p. 78.
Hoyle, F., *The intelligent universe*, Londres, Michael Joseph, 1983, p. 256.
Hunkapiller, M., Hood, L., « New Protein sequanator with increased sensivity », *Science*, 207, 1980, p. 523.
Jacob, F., *La Logique du vivant. Une histoire de l'hérédité*, Fayard, 1978.
Jacob, F., *Le Jeu des possibles*, Fayard, 1981.
Joyce, G.F. et Alnate, « Chiral selection in poly (C)-directed synthesis of oligo (G) », *30*, 6, 16.VII.1984.
Khorana, H.G., « Total synthesis of a gene », *Science*, 203, 1979, p. 614.
Kourilsky, Ph., *Les Artisans de l'hérédité*, Éditions Odile Jacob, 1987.
Lahav, N. et coll., « Peptide formation in the prebiotic ERA », *Science*, 201, 7.VII.1978, p. 69.
Lewin, R., « RNA catalysis gives fresh perspective on the origin of life », *Science*, 231, 7.II.1986, p. 545.
Lewis, R. J. et coll., « Igation of igonucleotides by pyrimidine dimers », *Nature*, 298, 22.VII.1982, p. 393.
Locquin, M.V. et coll., *Aux origines de la vie*, Fayard, 1987.
Lovelock, J.E., *La Terre est un être vivant. L'hypothèse gaïa*, Le Rocher, J.-P. Bertrand éd., 1986.
Margulis, L., *Symbiosis in cell evolution*, San Francisco, Freeman, 1981.
Matthews, C. et coll., « Deuterolysis of amino acid precursors », *Science*, 198, 11.XI.1977, p. 622.
Maugh, T., « Phylogeny : are methanogens a third class of life ? », *Science*, 198, 24.XI.1977, p. 812.
Maxam, A., Gilbert, W., « A new method for sequencing DNA », *Proc. Nat. Acad. Sci. US*, 74, 1977, p. 560.
Mehta, N. G., « An alternative view of the origin of life », *Nature*, 324, 4.XII.1986, p. 415.
Merrifield, R. B., *Solid phase peptide synthesis I*, 1963, p. 2149.
Miller, S., Orgel, L., *The origins of life on the earth*, Prentice-hall inc, 1974.
Monod, J., *Le Hasard et la Nécessité*, Le Seuil, 1970.
Montefiore, H., « Heavenly insemination », *Nature*, 296, 8.IV.1982, p. 296.
Nirenberg, M. W., « The genetic code II », *Scientific American*, 216, 1963, p. 80.

Noel, E., Tavlitzki, J., *12 Clés pour la biologie*, Belin, France Culture, 1985.
North, G., « Back to the RNA world — and Beyond », *Nature*, 328, 2.VII.1987, p. 18.
O'Sullivan, D., *The chemistry of life's origine*, Chem. and Eng. news, 27.VIII.1984, p. 23.
Olavesen, A., « Cosmochemistry and evolution », *Nature*, 275, 26.X.1978, p. 694.
Oparine, A. S., *L'Origine de la vie sur la Terre*, Masson, 1965.
Orgel, L. E. et coll., « Efficient metal-lon catalyzed template directed oligonucleotide synthesis », *Science*, 208, 27.VI.1980, p. 1464.
Orgel, L. E., *Les Origines de la vie*, Elsevier, 1976.
Peat, C. et Diver, W., « First signs of life on earth », *New Scientist*, 16.IX.1982, p. 776.
Pinto, J. et coll., « Photochemical production of formaldehyde in Earth's primitive atmosphere, *Science*, 210, 10.X.1980, p. 183.
Plata, F., Wain-Hobson, S., « Sida : immunité et vaccins », *La Recherche*, 193, 1.XI.1987, p. 1320.
Ponnamperuma, C., « A protective function of the coacervates against UV light on primitive earth », *Nature*, 299, 23.IX.1982, p. 347.
Ponnamperuma, C. et coll., « Current status of chemical studies on the origin of life », *Space life sciences*, 1, 1968, p. 64.
Prigogine, I., Stengers, I., *La Nouvelle Alliance*, Gallimard, 1979.
Rosnay, J. de, « La révolution biologique-le biokit », *Science & Vie* (numéro spécial), 1982.
Rosnay, J. de, *Les Origines de la vie*, Le Seuil, Points Science, 1977.
Rosnay, J. de, *Biotechnologies et Bio-industrie (Sciences de la Vie et Société)*, La Documentation française, 1979.
Rosnay, J. de, « Le génie génétique et ses applications », *Annales des Mines*, 1.1.1981, p. 33.
Rosnay, J. de, « La biotique », *L'Expansion*, 81-05-21, p. 149.
Rosnay, J. de, « Les biotransistors : la microélectronique du 21e siècle », *La Recherche*, 124, 1981, p. 870.
Rosnay, J. de, « Biologie, informatique et automatique, l'essor de la biotique », *Prospective et Santé*, 18, 1981, p. 21.
Ruffie, J., *Le Traité du vivant*, Fayard, 1982.
Sagan, D. et coll., « Cannibal's relief : the origin of sex », *New Scientist*, 6.VIII.1987, p. 36.
Sasson, A., *Les Biotechnologies-Défis et promesses*, Sextant 2-Unesco, 1983.
Schopf, J. W. et coll., « Early archean microfossils from warrawoona group », *Science*, 237, 3.VII.1987, p. 70.
Schopf, W. J., « The evolution of the earliest cells », *Scientific american*, 239, 1978, p. 48.
Schwartz R., Dayhoff, M., « Origins of prokaryotes, eukaryotes, mitochondria and chloroplasts », *Science*, 199, 27.I.1978, p. 395.
Scott, A., « Update on genesis », *New Scientist*, 2.V.1985, p. 30.
Scott, A., « Catalytic RNA and the origin of life », *New Scientist*, 3.X.1985, p. 28.
Scott, J., « Natural selection in the primordial soup », *New Scientist*, 15.XII.1981, p. 153.

Sharp, P. et coll., « The evolution of catalytic function », *Science*, 238, 6.XI.1987, p. 729.
Tanford, C., « The hydrophobic effect and the organisation of living matter », *Science*, 200, 2.VI.1978, p. 1012.
Testart, J., *De l'éprouvette au bébé spectacle*, Éditions Complexe, 1984.
Vavvalén, L. M., « The archaebacteria and euckaryotic origins », *Nature*, 287, 18.IX.1980, p. 248.
Watson, J., Crick, F., « Genetic implications of the structure of nucleic acid. A structure for DNA », *Nature*, 171, 1953, p. 964.
Watson, J., Tooze, J., *The DNA story*, San Francisco Freeman, 1981.
Westheimer, F.H., « Polyribonycleic acids as enzymes », *Nature*, 319, 13.II.1986, p. 534.
Wilford, J. N., « Idea that life began in clay gets support », *New York Times*, 10.IV.1985.
Woese, C. R., « A proposal concerning the origin of life on the planet earth », *J. of Molecular Evolution*, 13, 1979, p. 95.
Yamagata, Y. et coll., « Phosphorylation of adenosine in aqueous solution by electric discharges », *Nature*, 282, 15.XI.1979, p. 284.
Zaug, A., Cech, T., « The intervening sequence RNA of tetrahymena is an enzyme », *Science*, 231, 31.I.1986, p. 470.
New theory for primordial gene code proposed, C & EN, 4.X.1982, p. 22.
« Simple molecules for ealy life ». *New Scientist*, 27.VI.1985, p. 18.
« L'Avenir des biotechnologies », *La Recherche* (numéro spécial), 188, 1.V.1987.
« Les défenses du corps », *La Recherche* (numéro spécial), 177, 1.V.1986.

ثبت المصطلحات

أدينوزين	adénosine	جزيء يتشكل من جمع الأدينين والريباسة.
أدينوزين ثُنائيّ الفسفات - أدينوزين ثُلاثي الفُسْفاتِ	ADP-ATP	جزيئات غنية بالطاقة
أدينين	adénine	مكوّن أساسي للحموض النووية وأحد "قواعد" الرمز الجيني.
الإشريكية القولونية	escherichia coli	بكتيريا موجودة في المعى (العصية القولونية). وهي المواد المثالية لدراسات الهندسة الجينية.
أكزون	exon	جين من دنا جسم معين يظهر على شكل بروتين (أنظر intronu أي الجين "الصامت")
أمُونيا	ammoniac	أحد الغازات في الغلاف الجوي الأولي للأرض.
أنترفرون	interféron	بروتين طبيعي مضاد للفيروس (وعلى الأرجح مضاد للورم) تفرزه الخلايا المعرضة للاعتداء.
إنترلوكين	interleukine	جزيء طبيعي يلعب دوراً هاماً في

		تنظيم آليات المناعة. يستعمل في علاج السرطان.
أنتروبيا	entropie	كمية فيزيائية تقيس درجة "تردّي" أو "استهلاك" الطاقة، وكذلك درجة عدم الانتظام في بنية منظمة.
أنترون	intron	جين صامت لا يبدو أنه يشارك في ترميز البروتين.
"الإنجاب"	procréatique	تناسل بشري بمساعدة طبية.
أنزيم	enzyme	جزيء من البروتين يعمل كمحفّز (مسرّع) للتفاعلات البيوكيميائية داخل الأجسام الحية.
أنزيمات الحظر	enzymes de restriction	أنزيمات خاصة موجودة في كل الخلايا، قادرة على أن تتعرف على الدنا وتفككه. تستعمل هذه الأنزيمات في الهندسة الجينية كمقصّ بيولوجي لقص الدنا وإعادة اتحاده مع قطع أخرى.
الإنشاء البيولوجي	biosynthèse	إنتاج جسم حيّ لمواد كيميائية
استقلاب	métabolisme	اسم يطلق على مجموعة العمليات الكيميائية التي تجري داخل الخلية وبالتالي على مجمل تفاعلات الجسم الحي التي تولد الطاقة.
ببتيد	peptide	سلسلة قصيرة مكونة من عدة حموض أمينية مرتبطة ببعضها البعض.

برفيرين	porphyrine	صباغ بيولوجي أساسي (كلوروفيل، هيم).
بروتين	proteine	جزيء عملاق مكون من سلسلة حموض أمينية مرتبطة الواحدة بالأخرى، وهي اللبنات التي تبنى بها الكائنات الحية. والبروتينات التي تحفز التفاعلات في الاستقلاب هي الأنزيمات.
بكتيريا	bactérie	جسم أحادي الخلية يبلغ حجمه حوالى ميكرون واحد. بعض أنواع البكتيريا مُمْرضة لكن أغلب الأنواع مفيدة للإنسان في عدد كبير من السيرورات الطبيعية.
بلعم	macrophage	خلية كبيرة تتنقل في أنسجة الجسم وتلعب دوراً في الكشف عن خلايا غريبة أو غير طبيعية وتدميرها.
تحلل الغلوكوز	glucolyse	تفاعل تنقسم فيها خلية غلوكوز مكونة من ست ذرات من الكربون إلى قسمين كلّ قسم منهما مكون من ثلاث ذرات.
تخمير	fermentation	تسمح هذه العملية بتأمين الطاقة من خلال التدرّج (غير المكتمل) للمواد العضوية في غياب الأكسجين.
تركيب ضوئي	photosynthèse	عملية تستعمل طاقة الفوتونات (الضوء) وتسمح بتركيب مواد عضوية. والأكسجين منتج ثانوي

		للتركيب الضوئي. ويجري تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية في صانعات الكلوروفيل.
التقانة البيولوجية	**biothechnologie**	مجموعة العمليات الصناعية التي تقتضي استعمال وتشغيل الأجسام الحية: كالبكتيريا والخميرة والخلايا النباتية والحيوانية.
تنفس	**respiration**	عملية تزوّد بالطاقة من خلال أكسدة المواد العضوية المتأتية من الأغذية. وتتحول نتائج تحلل السكر إلى ثُلاثِي فُسْفاتِ الأَدِينُوزِين بوجود الأكسجين وذلك في معمل الخلية المعروف بالمتقدرة.
تهجين	**hybridation**	تفاعل يؤدي إلى تعرّف خيطي دنا متكاملين على بعضهما البعض والتفافهما الواحد حول الآخر.
جُبيلة رائية	**plasmide**	عنصر دائري صغير في الدنا موجود في بكتيريا ويمكن عزله بسهولة. تنتقل الجُبيلات الرائية من بكتيريا إلى أخرى وتتكاثر في داخلها. وهي تلعب دور الناقلات للجينات في عمليات الهندسة الجينية.
جزيء مَكروي	**macromolecule**	جزيء عملاق يتكون من آلاف الذرات مثل البروتين أو الحموض النووية.

جزيئات مقترنة	molecules conjuguées	جزيئات تحمل "روابط إلكترونية" داخلية.
جين	géne	قسم من جزيء الدنا الذي يرمّز تسلسل الحموض الأمينية التي تشكل البروتين.
حقيقي النواة	eucaryote	صفة للأجسام التي تكون نوى خلاياها محاطة بغشاء.
حلية لمفاوية	lymphocyte	كرية بيضاء صغيرة تنتج الأضداد (لمفاوية B) أو تلعب دوراً في تعظيم آليات المناعة (لمفاوية T).
حمض أميني	acide aminé (aminoacides)	جزيء صغير تتشكل منه البروتينات. وهو موجود بأكثر من ٢٠ نوعاً مختلفاً.
حَمْضُ الريبونوكلييك (رنا)	ARN	نسخة عن الرمز الجيني لحمض الدنا (الرنا المرسال) أو مكيِّف وحالّ للرموز يستخدم لترجمة لغة الجينات إلى لغة البروتينات (الرنا الناقل)
حَمْضُ السيانيدريك	acide cyanhydrique	جزيء تفاعلي صغير تشكل في الغلاف الجوي الأولي للأرض.
حمض الفوسفوريك	acide phosphorique	مكوِّن للأدينوزين ثلاثي الفُسْفات والحموض النووية.
حمض نوويّ	acide nucléique	جزيء عملاق (أنظر جزيء مَكروي) يعتبر أساساً للمعلومات الجينية.
دنا	ADN	حمض الديوكسي ريبونوكلييك

		الموجود في نواة الخلية، وهو مكوِّن أساسي للصبغي وداعم للوراثة.
ذاتيّ التّغَذّي	**autotrophe**	كائن حي قادر على صنع غذائه بشكل مستقل.
رامزة	**codon**	مجموعة من ثلاث قواعد من الدنا أو الرنا تعيّن موقع حمض أميني في سلسلة البروتينات.
رمز جيني	**code génétique**	رمز لترجمة البروتينات من خلال الدنا. وهو ترابط بين ترتيب القواعد في الدنا وتسلسل الحموض الأمينية التي تشكل البروتينات.
ريباسة	**ribosome**	كرّيات من البروتين والرنا حيث يجري تركيب البروتينات. تعتبر الريباسات "مركز جمع" البروتينات.
ريبوز	**ribose**	سكّر مكون من خمس ذرات من الكربون، وهو أحد مكونات الرنا.
ريبوز ديوكسي	**désoxyribose**	سكر مكون من خمس ذرات من الكربون، وهو مكوّن أساسي لحمض الديوكسي ريبونوكلييك.
سلولاز	**cellulase**	أنزيم يفكّك السلولوز إلى غلوكوز.
سيتوبلازما	**cytoplasme**	القسم الداخلي للخلية باستثناء النواة.

شِبْهُ بروتين	protenoïde	بروتين غير بيولوجي.
شحم	lipide	جزيء غير ذوّاب في الماء، مثل الدهون أو الزيوت.
صَانِعَةُ الكلوروفيل	chloroplaste	بنية الخلية النباتية حيث يتم التخليق الضوئي.
صبغيّ	chromosome	خيط يحمل المعلومات الجينية، مكوّن من بروتينات ودنا وموجود في نواة الخلية. يمكن رؤية الصبغيات أثناء انقسام الخلايا وعددها ثابت لكل نوع.
ضدّ [ج: أضداد]	anticorps	بروتين موجود في الدم ويشكل قاعدة لنظام المناعة عند الثديّيات. تتجمع الأضداد بشكل خاص مع مواد غريبة مماثلة لها تدعى مُسْتَضِدّات.
ضدّ وحيد النسيلة	anticorps Monoclonaux	إنه ضدّ مميّز يتشكل من سلالة خلية هجينة تدعى منشأ مخبري (انظر هذه الكلمة).
طفرة	mutation	تحوّل في تركيب الدنا بواسطة عامل فيزيائي أو كيميائي. يطلق على كل ما هو أهل لأن يتسبب بطفرة اسم "مطفّر". والتحولات الناجمة عن الطفرات هي وراثية.
عاثية البكتيريا	bactériophage	فيروس يضرب البكتيريا (تسمى أيضاً عاثية).
عُضَيّات	organite	عضو خلوي داخلي صغير.
غيري الإغتذاء	hétérotrophe	صفة الجسم الحي غير القادر على

		تصنيع أغذيته بوسائله الخاصة ومجبر على أخذها من الخارج.
فُوتُون	**photon**	"حبة" أولية من الضوء أو الحرارة.
فورمالدهيد	**formaldéhyde**	جزيء تفاعلي صغير تشكل في الغلاف الجوي الأولي للأرض.
في المكان الحيّ	**in vivo**	صفة لتجربة بيولوجية تحدث في خلية أو في جسم حي.
فيروس	**virus**	الفيروس هو، على عكس البكتيريا، غير قادر على التطور أو التكاثر لوحده. إنه طفيلي بالضرورة. والفيروس هو مجموعة من البروتينات والحموض النووية.
قاعدة	**base**	القاعدة هي الضد الكيميائي للحمض. يطلق هذا الاسم أيضاً على حروف الرمز الجيني: أدينين وغوانين وسيتوزين وثيمين وأوراسيل (A, G, C, T, U)
قَوصَرَة	**coacervat**	قُطيرات مجهرية تتكون بتجمع جزئيات ضخمة مميّهة.
قوَيلِمَة	**protiste**	جسم مجهري مكوّن من خلية واحدة.
كائن ميكروي	**micro-organisme**	كائن حيّ مجهري.
كابت	**répresseur**	جزيء بروتيني يعلق على الدنا ويمنع تكوين نسخ من الجينات الرنا المرسال.

كريّة ميكروّية	microsphère	كريّة مجهرية تتكون من جراء تجمع البروتينويد.
ليغاز	ligase	أنزيم يربط شدف الدنا الواحدة بالأخرى.
متقدّرة	mitochondrie	مركز الطاقة في الخلية. في المتقدرات يتكون ثُلاثي فُسْفاتِ الأَدِينُوزِين، الذي تحرقه كل الكائنات الحية.
مُتَلَحْفَة	chlamydomonas	طحالب مسوّطة مجهرية مكونة من خلية واحدة فقط.
مُتَناعِلاَت	paramécies	"حيوان" مجهري أولي يتكون من خلية واحدة.
مسبار	sonde	مقطع من الرنا أو الدنا يتسم بالإشعاع ويسمح بفرز جين معين.
مُسْتَضِد	antigène	جزيء (عادة بروتين) يؤدي لدى دخوله في الجسم إلى تنبيه إنتاج أضداد تتفاعل بدورها مع هذا المُسْتَضِد.
مستقبِلة	recepteur	بروتين يتواجد عادة في الغشاء الخلوي، وهو قادر على الالتصاق ببنى معينة تعمل كإشارات كيميائية (هورمون، فيروس، دواء).
مستقلَب	métabolite	جزيء ضروري لحياة الخلايا.
مسرطِن	cancérigène	يولِّد مرض السرطان. تعتبر بعض المنتجات الكيمائية والفيروسات مسرطنة.

مكثور	polymère	سلاسل طويلة من الجزيئات العملاقة تتكون من وحدات بنيوية صغيرة متكررة.
مُكوّن الورَم	oncogène	جين يتدخل في تحويل الخلايا الطبيعية إلى خلايا سرطانية. تحمل بعض الفيروسات مكونات للورم.
منشأ مخبري	hybridome	خلية هجينة تتكون من انصهار خلية لمفاوية وخلية نقيوم (خلية سرطانية). تستخدم المنشآت المخبرية في إنتاج أضداد وحيدة النسيلة.
موقع فعّال	site actif	منطقة من الأنزيم حيث يجري تفاعل كيميائي.
ميثان	méthane	غاز طبيعي مكوّن من ذرة كربون ومن أربع ذرات من الهيدروجين موجود بكميات كبيرة في الغلاف الجوي الأولي للأرض.
ناقل	vecteur	عامل لنقل الجينات يستعمل في اختبارات الهندسة الجينية. قد يكون الناقل بلازميد قادر على التكاثر داخل البكتيريا.
النسيلة	clone	مجموعة من الخلايا المتحدرة من خلية واحدة أساسية بفعل الانقسامات المتتالية.
النضال البيولوجي	lutte biologique	دفاع ضد اعتداءات العوامل المُمرضة بمساعدة وسائل بيولوجية.

نقيوم	myélome	نوع من السرطان حيث تنتج الكريات البيضاء كميات مفرطة من بروتينات معينة.
نواة	noyau	"مركز القيادة" في الخلايا الحقيقية النواة (راجع هذه الكلمة) يحتوي على صبغيات حاملة الخواص الوراثية على شكل جينات دنا.
نوكليوتيد	nucléotide	وحدة وظيفية للحموض النووية مكونة من واحدة من القواعد الأربع A وC وT وG ترتبط بها مجموعة من السكر والفوسفات.
هرمون	hormone	مواد تفرزها غدة الإفراز الداخلي (الصمّاء) فتنتقل إلى الدم وتُنقل نحو الأنسجة حيث تقوم بعمل محدد.
الهندسة الجينية	génie génétique	تقانة بيولوجية تستعمل لتعديل المعلومات الوراثية في الخلية الحية بشكل يجعلها تنجز مهام مختلفة. تؤدي الهندسة الجينية إلى "إعادة برمجة" الخلايا.
هيم	hème	صباغ أسمر، هو أحد مكوّنات الهيموغلوبين.
هيموغلوبين	hémoglobine	جزيء بروتيني يحتوي على حديد وقادر على التقاط الأكسجين بطريقة لاعكوسة وبالتالي نقله في الجسم. يوجد الهيموغلوبين في كريات الدم الحمراء.

فهرس عام

ـ أ ـ

الأحياء المجهرية: ٢٧، ٢٨، ٣١، ٣٣

اختبار آيمز: ٢١٥

إدمن، ب: ٢٠٣

أربر، و: ٢١٩

أرسطو: ١٣، ١٤، ٧٤

أرينيوس، سفانت: ٢٤

الإشريكية القولونية: ٣٦، ٤١، ١٧٣، ١٧٥، ١٧٧، ٢١٨ـ٢٢٠

الإشعاع الكهرمغنطيسي: ٥١، ٥٣ أنظر أيضاً الطاقة الشمسية.

أطفال الأنابيب: ٢٥٤ ـ ٢٦٠

الإلكترون: ٦١ ـ ٦٣، ٦٦، ٦٧، ٦٩، ١١٦، ١٤٣، ١٤٤، ١٧١، ١٩٠، ٢٢٩

أمبير: ٩٢

الأمراض الوراثية: ٢٥٢

أمندين: ٢٥٤، ٢٥٥

الامونيا: ١٨٧، ١٩٤

الانتروبيا (القصور الحراري): ٥١، ٨٦، ١٦١

الانتقاء الطبيعي: ٢٢

الأنزيمات: ٤٧، ٦٤ هـ، ٧٠، ٧٨ ـ ٨٠، ٩١، ٩٦، ٩٧، ١٠٧، ١٣٢، ١٣٣، ١٣٥، ١٣٦، ١٦٥، ١٦٧ ـ ١٧١، ١٧٥، ١٧٨، ١٨١، ١٨٢، ١٩٠، ١٩١، ٢١٩، ٢٢٢، ٢٢٥، ٢٣١ ـ ٢٣٣، ٢٣٥، ٢٣٩، ٢٤٧، ٢٦٣

أوپارين، أ: ١٠٣، ١٠٦ ـ ١٠٩، ١١٧، ١١٨، ١٢١، ١٥٣، ١٥٤، ١٥٦، ١٥٨، ١٦١، ١٨٦

أورجل، لسلي: ١٢٥، ١٢٦، ١٣٣، ١٣٨، ١٣٩

أورو، ج: ١٢٣، ١٢٤، ١٢٦

أوري، هارولد: ١١٨

الأولانيّات: ٢٨، ٢٩، ٣١، ٤٩

إيتاكورا، ك: ٢٠٤
إيجن، مانفرد: ١٤٨، ١٤٩

ـ ب ـ

باراميسيوم (المتناعلة): ٣١، ٣٣
باربالي: ٢٥٤
بارتيون، ألفونس: ٢٦٣
باستور، لويس: ١٨، ١٩، ٢٧، ٢٨، ١٠٣، ٢٣٨
باكر، ب. م: ١٩٢
الباليونتولوجيا: ٢٣
براون، لويز: ٢٥٤
البرفيرين: ١٤٠ ـ ١٤٣
برنارد، كلود: ٩٨
برنال، ج. د: ١٣٣، ١٣٤
البروتينات: ٣٣، ٣٩، ٤٢، ٤٧، ٦٤ هـ، ٧٠ ـ ٧٢، ٧٤ ـ ٧٦، ٧٨، ٨٢ ـ ٩٠، ١٠٠، ١٠٥، ١٠٧، ١٢٠، ١٢٣، ١٣٤، ١٣٥، ١٤٤، ١٤٧، ١٤٩، ١٥٥ ـ ١٥٧، ١٧٢، ١٧٥، ١٧٧، ١٧٨، ١٨٠ ـ ١٨٢، ١٨٧، ١٩٣، ٢٠٢ ـ ٢٠٦، ٢٠٨، ٢٢٢، ٢٢٣، ٢٢٥، ٢٣١، ٢٣٣ ـ ٢٣٥، ٢٤٢، ٢٤٧، ٢٤٩، ٢٥٠
بريغوجين، إيليا: ١٤٨، ١٦٠، ١٦٢
البصمة الجينية: ٢٦٣
البكتيريا: ٢٨، ٣٥ ـ ٣٨، ٤٢، ٤٥، ٤٦، ٩٠، ١٠٥، ١٣٩، ١٥٦، ١٧٥، ١٨٧، ١٩٢، ١٩٣، ٢١٤، ٢١٩، ٢٢٥، ٢٢٩، ٢٣٨، ٢٣٩، ٢٤٢، ٢٤٣، ٢٤٥، ٢٤٩، ٢٥١
ـ خريطتها: ٢٩، ١٦٦
ـ سمومها: ٣٦
البلازميدات: ٢١٨
بلودجت: ٢٢٩
بوابيه، هربرت: ٢٣٩
بوشيه، فيليكس: ١٨، ٢٠
بوفون: ١٧
بوفي، ر: ١٢٨، ١٦٢
بولتون، ماثيو: ٩١، ٩٢
بولمان، ب: ١٤٤، ١٤٥
بونامپروما، سيريل: ١٢٤، ١٢٦، ١٣٦، ١٣٨، ١٨٥
بيدرسن، شارلز: ٢٣١
بيرثولو، د: ١٠٨ هـ
بيكريل، ب: ١٠٨ هـ
البيولوجيا الجزيئية: ٢٦، ٢٧

ـ ت ـ

التبزّر الشامل: ٢٤، ٢٥
التحفيز الذاتي: ١٤٠، ١٤٢

التخليق الضوئي: ٣٦، ٥٣ ـ ٥٥، ٥٧، ٦٢، ٦٣، ٦٧، ١٠٧، ١٦٥، ١٦٨، ١٨٥ ـ ١٨٧، ١٨٩، ١٩١، ١٩٢، ١٩٦
التخمير: ١٦٥، ١٦٧، ١٦٨، ١٨٥، ١٨٧، ١٨٩ ـ ١٩٢، ١٩٧، ٢٣٨، ٢٨١
تستار، جاك: ٢٥٥
التطور البيولوجي: ٢٠١، ٢٠٢
التقوصر: ١٥٤ ـ ١٥٦، ١٦١، ١٦٢، ١٨٥
التلوث الكيميائي: ٩، ١٩٥
التهجين: ٢٢٦ ـ ٢٢٨، ٢٣٥، ٢٤٧، ٢٥٢
توالد الكائنات الجنسي: ١٥، ١٧، ٣١
توالد الكائنات العفوي: ١٣ ـ ٢٠، ١١٨، ١٢٠
تودارو ج. ج: ٢١٠
توما الأكويني: ١٤
تونيغاوا، سيسيمو: ٩٠، ٢٢٨

ـ ث ـ

ثاني اكسيد الكربون: ٥٤، ٥٥، ٦٣، ٦٧، ٧٢، ١٠٨، ١٦٧، ١٨٥، ١٩٠، ١٩١، ١٩٤ ـ ١٩٧
ثلاثي فسفات الأدينوزين (ATP): ٥٤، ٥٧، ٦٣، ٦٧، ٦٨، ١٠٧، ١٢٤، ١٣٧، ١٦٦، ١٧٦ هـ ، ١٩١، ٢٦٩، ٢٧١، ٢٧٣، ٢٧٤، ٢٨١ ـ ٢٨٤
ثنائي فسفات الأدينوزين (ADP): ٥٦، ٥٧، ٦٣، ٦٧، ٢٨١
الثورة البيولوجية: ٩، ٢٧، ٢٠١ ـ ٢٠٤، ٢١٧، ٢٣٧
الثورة الصناعية: ٩٢

ـ ج ـ

جاكوب، فرنسوا: ٧، ٩١، ٩٧، ٢٠٦، ٢١٧، ٢٣٨، ٢٥٠
الجراثيم: ١٨، ١٩، ٢٣، ٢٤، ٢٧، ٢٨، ٤٣، ٤٦، ٤٨، ٩٩، ١٩٤، ٢٣٧، ٢٣٨، ٢٤٢ ـ ٢٤٦
ـ النافعة: ٢٣٧، ٢٣٨، ٢٤٢
الجزيئات العضوية: ١٣١ ـ ١٣٣
الجزيئات المترافقة: ١٤٤، ١٤٥، ١٤٩
جوبلت: ١٧، ٢٨، ٣١
جيفريز، أليك: ٢٦٣
جيلبرت، والتر: ١٧٩، ٢٠٣، ٢٦٢

الجينات: ٧٨، ٨٩، ٩٠، ٩٧،
٢١٧، ٢٣٢، ٢٣٤، ٢٣٥،
٢٤٤، ٢٥٣، ٢٦٢
ـ المرضية: ٢٥١ ـ ٢٥٣، ٢٥٧، ٢٦٢
ـ الورمية: ٢٠٨ ـ ٢١١، ٢٣٤، ٢٣٥
أنظر أيضاً الخلايا السرطانية
جيورجي، أ: ٦٩

- ح -

حمض الديوكسي ريبونوكلييك (دنا ـ ADN): ٤٣، ٤٥، ٦٩، ٧٥،
٧٦، ٧٨، ٨٢ ـ ٨٦، ٨٨،
٨٩، ٩١، ٩٧، ١٠٠،
١٣٩، ١٧٢ ـ ١٧٤، ١٨١،
١٨٢، ١٨٤، ١٩٤، ٢٠٢،
٢٠٣، ٢٠٥، ٢٠٩، ٢١٣،
٢١٨، ٢١٩، ٢٢٢، ٢٢٦،
٢٢٧، ٢٣١، ٢٣٤، ٢٣٥،
٢٣٩، ٢٤٤، ٢٤٧، ٢٤٩،
٢٥٠، ٢٦٠، ٢٦١، ٢٦٣،
٢٦٥، ٢٧٣، ٢٧٥، ٢٧٦،
٢٧٨
حمض الريبونوكلييك (رنا ـ ARN): ٤٥، ٨٣ ـ ٨٩، ٩٧،
١٣٩، ١٤٢، ١٧٣، ١٧٤،
١٧٦ ـ ١٨٢، ١٨٤، ٢٧٦
ـ الصناعي: ١٧٤ ـ ١٧٧
حمض السيانيدريك: ١٢٣، ١٢٤،
١٢٧، ١٣٥
حمض الغلوتاميك: ٢٣٢
حمض الفالين: ٢٣٢
حمض الفورمالدهيد: ١٢٤ ـ ١٢٨
الحمض الفوسفوري: ٧٧، ١٣٦،
٢٧٠، ٢٧٣
الحمض الكهرماني: ١٤٠، ١٤١
حمض الميتافسفريك: ١٣٨
الحموض الأمينية: ٧١، ٧٣، ٧٨،
٨٢، ٨٣، ٨٥، ٨٧، ١٠٥،
١٢٠، ١٢٢، ١٢٣، ١٢٦،
١٢٨، ١٣٣ ـ ١٣٥، ١٤٤،
١٥٦، ١٥٧، ١٧٣، ١٧٥،
١٨٠، ١٨٧، ٢٠٢، ٢٣١ ـ
٢٣٣
ـ الميثيونين: ٨٢
ـ الهستيدين: ٨٢
الحموض النووية: ٣٤، ٣٧، ٣٩ ـ
٤٣، ٤٥، ٤٩، ٧٠، ٧٤،
٧٦، ١٠٠، ١٠٧، ١٢٣،
١٢٥، ١٢٦، ١٢٨، ١٢٩،
١٣٣، ١٣٩، ١٦٥، ١٧٧،
١٧٨، ١٨٣، ١٩٣، ٢٠٢ ـ
٢٠٤، ٢٢٢، ٢٢٦، ٢٣٣،
٢٤٧
ـ الأدينين: ١٢٣، ١٢٤، ١٣٦،
١٤٣، ٢٧٤

ـ خ ـ

خريطة المجين البشري: ٢٥١، ٢٦٥
الخلايا السرطانية: ٤٣، ٩٩، ١٧٣، ٢٠٦ ـ ٢١٥، ٢٢٠، ٢٢٣، ٢٢٥، ٢٢٦، ٢٢٨، ٢٥٢، ٢٦٢، ٢٦٦
الخلق بالصدفة: ٢٦
الخلية الحية: ٣١ ـ ٣٣، ٣٥، ٣٩، ٤١، ٤٣، ٤٥ ـ ٥٠، ٥٥، ٦٤، ٦٥، ٦٩، ٧٠، ٧٤، ٨٣، ٨٥، ٨٦، ٨٩، ٩١، ٩٦، ٩٧، ٩٩، ١٠٠، ١٠٧، ١٥٨، ١٦٥هـ، ١٦٨، ١٩٤، ٢٠١، ٢٠٤ ـ ٢٠٧، ٢٠٩، ٢١٧، ٢١٨، ٢٣١، ٢٦٦
ـ البشرية: ٢٩، ٧٥، ٧٦
ـ النباتية: ٥٦

ـ د ـ

داروين، تشارلز: ٢٠، ٢٢، ٢٣، ١٠٣، ١٠٩، ١٦٢
دايهوف: ١٩٣
الدماغ البشري: ١٠٤
دوشاردان، تيلارد: ١٠٣، ١٠٤
دوفيلييه، أ: ١٣٤
دوليتل، راسل ف: ٢٠٩، ٢٣٤
ديكارت، رينيه: ١٥

ـ ذ ـ

ذاتية الاغتذاء (الكائنات): ٢٩، ١٠٨، ١٨٥ ـ ١٨٧، ١٩٢، ١٩٦

ـ ر ـ

رابينوفيتز: ١٢٦
الرمز الجيني: ٢٩، ٨٠، ٨٢، ١٢٤، ١٣١، ١٣٩، ١٥٣، ١٧٢ ـ ١٧٤هـ، ١٧٧، ١٨٠، ٢٠١، ٢٠٣، ٢٠٤، ٢٢٧، ٢٣٢، ٢٥٢، ٢٦٥، ٢٧٥
أنظر أيضاً الجينات.
الريباسات: ٣٣، ٨٤ ـ ٨٨، ١٧٣هـ، ١٧٨، ١٧٩
الريبوز: ١٢٥، ١٣٦، ٢٧٠، ٢٧٤، ٢٧٦
ريدي، فرنسيسكو: ١٥ ـ ١٧، ١٩

ـ ز ـ

زوغ، آرثر ج: ١٧٨

ـ س ـ

ساغان: ١٢٦، ١٣٦، ١٣٧
سيالنزاني، لازارو: ١٧
سبورن، م. ب: ٢١٠

سبيغلمان، س: ١٧٣، ١٧٦
ستانلي، و. م: ٣٨
سش، توماس ر: ١٧٨
سنجر، ف: ٢٠٣
سوانسن، روبرت: ٢٣٩
سيبرنطيقا: ٩٢، ١٩٤
السيبرنيات: ٢٦
السيتوبلازما: ٣٢، ٣٣، ٤٨، ١٠٠، ٢٠٨

- ش -

شامبون، بيار: ٢٤٠
شامبليون: ٢٠٣
الشبكة العصبونية: ٢٣٥
شتاينمان: ١٢٦
شجرة نسب الأنواع: ٢٣، ٢٥
شجرة نسب جزيئات الحياة: ١٥١
شرام، ج: ١٣٨، ١٨٢
شوارتز: ١٩٣
شويف، ج. م: ١٩٢
شيمل، ب: ١٨٠ هـ

- ص -

صانعة الكلوروفيل: ٥٧ ـ ٦٢
الصبغيات: ٧٦، ١٤٥
الصناعة البيولوجية: ٢٣٧ ـ ٢٤١، ٢٤٤ ـ ٢٤٨

- ط -

الطاقة الشمسية: ٢٩، ٤٩ ـ ٥٣، ٥٥ ـ ٥٧، ٦٠، ٦٢، ٦٣، ٦٧، ٦٩، ١٠٧، ١٠٨، ١١٠ ـ ١١٤، ١١٧، ١١٨، ١٢٢، ١٣١، ١٨٥، ١٨٦، ١٩٤، ٢٤٥
طبقة الأوزون: ١٨٦، ١٨٧، ١٩٥ ـ ١٩٧
الطحالب: ٣٤، ١٦٦، ١٩٤
ـ المسوّطة: ٣٣
ـ المتلحفة: ٣٣، ٣٤، ٣٧، ٥٣، ١٩٣
الطفيليات: ٣٩، ٤٣
أنظر أيضاً الفيروسيات.

- ع -

عالم الحياة اللامرئية: ١٦
العصوية الثورنجية: ٢٤٢
علم الأجنة: ٢٣، ٢٠٦
علم الوراثة: ٨٩، ٢٠٦، ٢١٣، ٢٣٨
أنظر أيضاً الهندسة الوراثية.

- غ -

غاليليو: ١٤
غلاسر، د: ٢٣٩

الغلاف الجوي: ١٠٨، ١١٤، ١١٦، ١٢١، ١٢٨، ١٩٤
الغلوكوز: ٥٣ ـ ٥٥، ٥٧، ٦٣، ٦٥ ـ ٦٨، ٩٨، ١٢٥، ١٥٩، ١٦١، ١٦٦ ـ ١٦٨، ١٨٦، ١٩٠، ١٩١، ٢٧٠، ٢٨١
غوديشون، هـ: ١٠٨ هـ
غيرية الاغتذاء (الكائنات): ٢٩، ١٠٨، ١٠٩، ١٥٩، ١٦٦، ١٦٧، ١٨٤، ١٨٦، ١٩٦

ـ ف ـ

ڤالد، ج: ٢٦
فقر الدم: ٢٣٢
أنظر أيضاً كريات الدم الحمراء
الفوتون: ٥٢، ٥٣، ٥٧، ٦١، ٦٣، ٦٩، ١١٦
فوكانسون: ٩٣
فوكس، س. و: ١٣٤، ١٣٥، ١٥٤ ـ ١٥٨
الفيروسات: ٢٧ ـ ٢٩، ٣٧ ـ ٣٩، ٤١ ـ ٤٥، ٤٨، ٧٥، ٨٨، ١٧٣، ٢٠٦، ٢٠٩، ٢١٦، ٢٢٣، ٢٢٥، ٢٢٩، ٢٤٠
ـ خريطتها: ٢٩
ـ السيدا: ٣٩، ٤٢ ـ ٤٤، ٢٢٠، ٢٤٠، ٢٥٣
ـ العاثية: ٣٩، ٤٠.
ـ ك. بيتا: ١٧٥ ـ ١٧٧
ڤيكرامازينفي، ن. س: ٢٤

ـ ك ـ

كاتشلسكي، أ: ١٢٦، ١٣٣
الكازار: ١١٠
كالڤين، ملڤين: ١٢٣، ١٢٤، ١٤٢
كانون، والتر: ٩٨
الكائنات البدائية: ٦٤، ١٠٨، ١٠٩، ١٢٢، ١٥٢، ١٦٥، ١٦٨، ١٧٢، ١٨٣ ـ ١٨٥، ١٩١ ـ ١٩٣
الكائنات الحية: ١٣، ٣٤، ٣٨، ٣٩، ٤٥، ٤٩ ـ ٥١، ٥٤، ٧٥، ٧٨، ٩٠، ٩٢، ٩٩، ١٠٠، ١٠٧، ١٠٨، ١٢٠، ١٢٦، ١٢٩، ١٣٣، ١٣٤، ١٣٧، ١٤٢، ١٤٨، ١٥٣، ١٦٠، ١٧٢، ١٩٢، ٢٠١، ٢٠٢، ٢٠٤، ٢٢٥، ٢٥١
الكائنات المجهرية: ٢٤٢
كرابس، هانز: ٦٧
كريات الدم البيضاء: ٤٣، ٤٨، ٧٣، ٩٩، ٢٢٣
كريات الدم الحمراء: ٤٨، ٧٢ ـ ٧٤، ١٠٥، ١٤٠هـ، ٢٣٢

كريك، ف. هـ. س: ٢٤، ٧٤، ٢٠٣
كلارك، روبرت: ٢٥٤
كلاين، مارتين: ٢٥٢
الكلوروفيل: ٢٩، ٣٣، ٣٤، ٣٦، ٤٨، ٥٤، ٥٧ ـ ٥٩، ٦١ ـ ٦٣، ١٠٧، ١٤٠، ١٨٥، ١٨٧، ١٩٢ ـ ١٩٤
كورنبرغ، أ. ل: ١٧٣
كوريلسكي، فيليب: ٢٤٠
كوفينيال: ٩٢
كوهلر، ج: ٢٢٣، ٢٢٦
كايب، رونالد: ٢٣٩

ـ ل ـ

لانغمير: ٢٢٩
لاهان، نوام: ١٢٥، ١٣٣
لورمان، ر: ١٢٥
لوف، أندريه: ٧، ٩١، ٢٠٦، ٢٥٠
لوفلوك، ج. أ: ١٩٤
لووينهوك، انطوان فان: ١٦، ١٧، ٣١، ٣٥
لين، جان ماري: ٢٣١
اللُيَيْفات العصبية: ١٤٥

ـ م ـ

مارغوليس، لين: ١٩٣
المتقدرات: ٣٣، ٣٦، ٥٤، ٦٤ ـ ٦٨، ١٩٣
مريفيد: ٢٠٣
المستقبلات: ٩٦ ـ ٩٩، ٢٠٥، ٢١١
أنظر أيضاً البروتينات
المستقلبات: ٩٦
مكسم، أ. م: ٢٠٣
مونتانييه، لوك: ٤٢
مونو، جاك: ٧، ٢٧، ٩١، ٩٧، ١٧١هـ، ٢٣٨، ٢٥٠، ٢٦٥
ميد، توماس: ٩١
ميلر، ستانلي: ١١٨ ـ ١٢٢
ميلستاين، س: ٢٢٣، ٢٢٦
ميلياس، روبرت: ٢٦٢

ـ ن ـ

نشأة الكون: ١٥، ١٠٤، ١٠٩ ـ ١١٤، ١١٧، ١٢٦
نظرية داروين: أنظر داروين، تشارلز.
نظرية مركزية الأرض: ١٥
النوكليوتيد: ١٢٥، ١٣٦، ١٣٨، ١٣٩، ١٧٦، ٢٠٢، ٢٣٢، ٢٣٣، ٢٧٦
نيدهام، جون: ١٧، ٢٨
نيرنبرغ، م. و: ١٧٣، ٢٠٣

نيوتن، إسحاق: ١٥

ـ هـ ـ

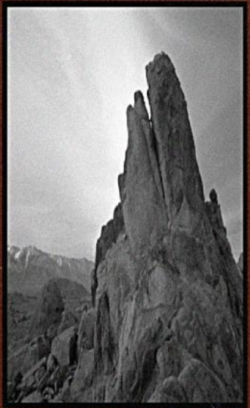
هارفي، وليام: ١٥
هالدان، ج. ب. س: ١٠٨، ١٠٩، ١١٧
الهرمونات: ٤٧، ٤٨، ٩٩، ٢٠٥
هلمونت، جان باتيست فان: ١٥
الهندسة الوراثية: ٣٥، ١٣٩، ٢٠٣، ٢١٦ ـ ٢٢١، ٢٢٦، ٢٢٨، ٢٣٨ ـ ٢٤٠، ٢٤٢ ـ ٢٤٨، ٢٥١ ـ ٢٥٣، ٢٥٦، ٢٦٠ ـ ٢٦٢، ٢٦٥
هو، ي. م: ١٨٠ هـ
هود، ليروي: ٢٠٣، ٢٦١
هورويتز، ن. هـ: ١٨٣
هونكپيلر، م. ف: ٢٠٣
هويل، فريد: ٢٤
الهيموغلوبين. أنظر: كريات الدم الحمراء.

ـ و ـ

واترفيلد، مايكل ف: ٢٣٤
واط، جايمس: ٩١، ٩٢، ٢٠٣
واطسون، ج. د: ٧٤
وايس، ب: ١٨٤
وست، م. و: ١٢٦ هـ
وهلر، ف: ١٢٠
ويلكنز، م. هـ. ف: ٧٤
وينر، نوربارت: ٩٢

مغامرة

الكائن الحيّ



- أصول المعرفة العلمية
- ثقافة علمية معاصرة
- فلسفة
- علوم إنسانية واجتماعية
- تقنيات وعلوم تطبيقية
- آداب وفنون
- لسانيات ومعاجم

المنظمة العربية للترجمة

كيف تؤثر "الثورة البيولوجية" فينا، بشكل ملموس؟ كيف نحسّن فهمنا للحياة بغية الحفاظ عليها، وكيف نحسّنه – وهذا أهم - بغية العيش بشكل أفضل؟ هذا الكتاب يسلط الضوء على الطريق التي نسلكها لمعرفة الكائن الحي بشكل أفضل. وهذه الطريق لها اتجاهان متلازمان: الأول هو اتجاه فهمِ الإنسان للحياة، والثاني هو اتجاه أثرِ فعلِ الإنسانَ في الحياة. ولقد تطلب هذا وضع ثلاثة أسئلة تبدو بسيطة ولكنها أساسية: ما الحياة؟ ومن أين تأتي الحياة؟ وإلى أين تذهب الحياة؟ وفي الكتاب اجتهادٌ في الاجابة عنها

جول دو روزناي دكتور في العلوم، باحث في المعلوماتية والكيمياء البيولوجية، مدير سابق لتطبيقات البحوث في معهد باستور الفرنسي .

د. أحمد ذياب: أستاذ جامعي في الطب ودكتور في الانتروبولوجيا، من تونس. له معاجم في المصطلحات الطبية ومعروف بدفاعه عن استعمال اللغة العربية في المجال الطبي .

علي مولا

الثمن: دولاراً
أو ما يعادلها

ISBN 9953-0-0431-5
9 799953 297933